Эрик Дрекслер

БЕЗГРАНИЧНОЕ БУДУЩЕЕ

SHOUT
SHARE
IT

Annotation

Эрик Дрекслер — известный американский учёный, «отец нанотехнологий», инженер, известный популяризатор нанотехнологий. Автор концепции нанотехнологического механосинтеза, первый теоретик создания молекулярных нанороботов, концепции «серой слизи». Книга Эрика Дрекслера (1991) — попытка рассказать о том, что такое нанотехнологии, почему они изменят наш мир и когда ждать их появления.

- Эрик Дрекслер
  - Вступление
  - Предисловие
  - Глава 1
    -
    - Кратко о технологиях
    - Немного о последствиях
    - Кратко о тенденциях
    - Другие последствия: сцены из постпрорывного мира
    - Технологии пересмотрены
    - Дорожная карта
    - Зачем об этом говорить?
    - Слова, блокирующие мышление
    - Трудность смотреть вперед
    - Исследовательские технологии
  - Глава 2
    -
    - Исследование молекулярного мира
    - Зрение и движение
    - Молекулярная текстура
    - Газ и жидкость
    - Слишком маленький и слишком большой
    - Загадочные цепочки
    - Наномашины
    - Клетки и тела
  - Глава 3
    -
    - Музей Силиконовой долины
    - Сырая технология
    - Идеи и критические замечания
    - Перспективы
  - Глава 4

-
- Будет ли это когда-нибудь достигнуто?
- Какие решения больше всего влияют на скорость продвижения?
- Почему инструменты так важны?
- Но разве наука занимается не только открытиями, но и инструментами?
- Какие инструменты используют исследователи для создания небольших устройств?
- Но разве нанотехнологии — это не просто очень маленькие микротехнологии?
- Приведет ли микротехнология к нанотехнологиям?
- Каковы основные инструменты, используемые для молекулярной инженерии?
- Как работает СТМ?
- Как работает АСМ?
- Могут ли проксимальные зонды перемещать атомы?
- Могут ли проксимальные зонды более точно перемещать атомы?
- Могут ли проксимальные зонды перемещать атомы с достаточной точностью?
- Каковы возможности проксимальных зондов?
- Как такие медленные системы могут построить что-то большое?
- Каковы основные преимущества молекулярных строительных блоков?
- Как белковая инженерия может построить молекулярные машины?
- Если мы можем делать белки, почему мы не строим оригинальные молекулярные машины?
- Что было уже достигнуто?
- Есть ли что-то особенное в белках?
- Каковы пути развития белковой инженерии?
- Кто еще занимается молекулярными объектами?
- Как смешивание химических веществ может создавать молекулярные объекты?
- Если химики могут создавать молекулы, почему они не строят причудливые молекулярные машины?
- Как химики смогут продвигаться к созданию молекулярных машин?
- Как исследователи проектируют то, что они не

могут видеть?
- Как молекулярное конструирование выглядит в сравнении с более знакомыми видами инженерных разработок?
- Разве инженерное конструирование не требует больше командной работы, чем наука?
- Препятствуют ли эти проблемы прогрессу?
- Несут ли японцы свою долю бремени в нанотехнологических исследованиях?
- Насколько хороша обоснованная догадка о том, сколько времени потребуется для развития молекулярных нанотехнологий?

○ Глава 5
-
- Преодоление разрыва
- Сценарий: разработка молекулярного манипулятора
- Еще один сценарий: следующий шаг к нанотехнологиям

○ Глава 6
-
- Сценарий: «Desert Rose Industries»
- Нанокомпьютеры
- Сборка изделий
- За кулисами и после этого
- Фабричное производство
- Репликаторы
- Универсальные ассемблеры
- Какие возможности мы получим?

○ Глава 7
-
- Компьютеры
- Прочные и легкие конструкции
- Ускорение развития
- Таблица развития науки и технологий
- Умные материалы
- Сокращение расходов

○ Глава 8
-
- Нанотехнология третьего мира
- Строительство и жилье
- Пища
- Связь
- Транспорт

- Открывая космические границы
- Глава 9
  -
  - Облегчить очистку
  - Прекращение химического загрязнения, сокращение потребления ресурсов
  - Ядерные отходы
  - Мусор как источник богатства
  - Зеленые продукты
  - Восстановление окружающей среды
  - Импортированные виды
  - Защитники экосистем
  - Восстановление земли
- Глава 10
  -
  - Медицина сегодня
  - Нанотехнологии в медицине
  - Работа вне тканей
  - Работа в тканях
  - Молекулярный ремонт
  - Корректирующая химия
  - Новые органы и конечности
  - Первая помощь
  - Страхование от чумы
  - Угроза
  - Наши неадекватные способности
  - Делать лучше
  - Решение сложных проблем
  - Старение
  - Восстановление видов
- Глава 11
  -
  - Некоторые границы возможностей нанотехнологий
  - Население
  - Решения вызывают проблемы
  - Изменение вызывает проблемы
  - Чистое, децентрализованное производство вызывает проблемы
  - Даже богатство и досуг вызывают проблемы
  - Изменение занятости вызывает проблемы
  - Изменения нарушают планы
  - Справиться с переменами
- Глава 12

        - Безопасность в обычной деятельности
        - Безопасность дома
        - Безопасность промышленности
        - Безопасная медицина
        - Чрезвычайные происшествия
        - Как создать большую проблему
        - Как этого избежать
        - Главная опасность: злоупотребления
        - Совместное управление
        - Нормативная тактика
        - Управление, делающее сложный выбор
        - Пытаться остановить потерю контроля
        - Ответственное действие
    - Глава 13
        -
        - Сценарий 0: Обычные ожидания (1990)
        - Сценарий 1: Триумфальная Поллианна
        - Сценарий 2: Цыпленок правит петухом
        - Сценарий 3: Международная техноконкуренция
        - Сценарий 4: Достаточная согласованность
        - Перспективы
    - Послесловие
        -
        - Мнение имеет значение
        - Где мы должны быть
        - Как мы можем туда добраться
        - Начинаем
    - Дополнительное чтение
    - Техническая библиография
    - Глоссарий
    - Благодарности
- notes
    - 1
    - 2
    - 3
    - 4

Эрик Дрекслер
Безграничное будущее: нанотехнологическая революция

Вступление

Нанотехнология. Научное описание сделано хорошо, инженерия осуществима, пути подхода многочисленны, последствия революционны, настают революционные времена, и все произойдет при наших жизнях.

Но что?

Никто не знает, что именно. Вот почему такая книга столь важна для того, чтобы молекулярная инженерия появилась, и трансформация вещества стала обычным делом. Технология будет развиваться постепенно и открыто, но последствия ее будут потрясающи и часто непредсказуемы.

Оценка перспектив развивающейся революции всегда является проблемой, потому что взгляд в будущее затенен текущими обстоятельствами и представлениями людей, незнакомых с предметом, некоторые из них надеются на положительные результаты, а кто-то смотрит на ситуацию с тревогой. И оптимисты, и пессимисты в отношении новых технологий печально известны своим ограниченным видением.

Искушение, которое они не могут побороть, состоит в том, что они рассматривают лишь одно из возможных применении или одну опасную или желаемую цель. Пример конкретного применения: сможем ли мы что-нибудь сделать из бриллианта? Образец страха или желаемой цели: что произойдет, если молекулярная медицина позволит людям жить веками?

Первое слово, которое приходит на ум после прочтения этой книги — осторожность. Второе — карнавал. Прорывы в нанотехнологии будут, скорее всего, самоускоряющимися и саморазмножающимися, как это произошло в последние несколько десятилетий с достижениями в области информационных технологий (и будут совершаться вновь и вновь, тем более, что нанотехнологии будут способствовать этому). Мы можем получить впечатляющую картину постоянных инноваций и сюрпризов с желаемыми результатами и непредвидимыми и противоречивыми побочными эффектами.

Как можно представить себе осторожный карнавал? В книге «Неограниченное будущее» приведены некоторые ответы.

Я наблюдал за развитием идей Эрика Дрекслера с 1975 года, когда он был еще студентом MIT, работающим над космическими технологиями (космические поселения, дешевые ракетные двигатели и солнечные паруса). Сам я в то время редактировал издание «Каталога всей Земли», призывающего вернуться «назад к основам». В обществе защитников окружающей среды и

спасателей мира одним из самых грязных ругательств было слово «технофикс» — исправление ситуации с помощью техники. Подобный подход считался очень плохим, поскольку этот примитивный путь использования для спасения окружающей среды исключительно высоких технологий не позволял предсказать появления новых и, возможно, худших проблем, к которым могло привести такое решение.

Но некоторые технофиксы, как мы начали замечать, обладали свойством изменять перспективы развития человечества безболезненно. Персональные компьютеры наделили полномочиями отдельных лиц и отняли централизованный контроль над коммуникационными технологиями. Космические спутники, поначалу отвергнутые экологами, оказались бесценными инструментами для наблюдения за состоянием природы, а их снимки Земли из космоса стали двигателем экологического движения.

Я думаю, что нанотехнологии также являются перспективным начинанием. Это набор технологий настолько фундаментальных, что они составляют целую новую область работы по возвращению к основам. Мы должны переосмыслить использование материалов и инструментов в нашей жизни и цивилизации.

В своей книге 1986 года «Машины создания» Эрик показал, что способен размышлять о такого рода вещах. Он предположил, что потенциальный хаос и опасность нанотехнологических революций требуют серьезных предварительных дебатов, и для того, чтобы начать их, он и его жена Крис Петерсон создали Институт Форсайта. Я написал о Форсайте статью для журнала и вскоре стал одним из их советников.

Таким образом, я получил возможность наблюдать за появлением текущих технических проблем нанотехнологий (на некоторые указал я), поскольку люди начали серьезно относиться к возможным перспективам. Незначительные вызовы были легко опровергнуты, а серьезные изменили и улучшили наши представления. Но саму идею никто не опроверг. Пока еще.

Моей задачей было следить за новостями об исследованиях, выполненных в различных технических дисциплинах, явно ориентированных на возможности нанотехнологий. Занимались ими в основном люди, которые ничего не знали друг о друге. Я убедил Эрика и Крис устроить для них конференцию. Первая Форсайт-конференция по нанотехнологиям состоялась в 1989 году в Стэнфордском университете. На ней обсуждались и технические, и культурные вопросы. Это сближение ускорило темпы развития надежд и исследований. И вот новая книга делает замечательный следующий шаг.

Как выяснилось из глобальной бизнес-сети, где я работаю неполный рабочий день, помогая транснациональным корпорациям думать о своем будущем, все футурологи довольно быстро обнаруживают, что точное предсказание невозможно. И создать будущее, нужное конкретно вам, тоже нельзя. Что же делать предусмотрительным людям? Одним из наиболее ценных инструментов исследования будущего оказалось сценарное планирование, где рассматриваются жизненные истории, которые имеют несколько продолжений в соответствующих фьючерсах. После чего предлагаются различные стратегии для их достижения. Сценарии корректируются, после чего применяются новые стратегии. И так до тех пор, пока сценарии и стратегии не окажутся согласованными, правдоподобными, удивляющими, проницательными и проверяемыми с помощью реальных событий по мере их развертывания. Предполагается, что в результате этого процесса будут выработаны «надежные» (адаптируемые) стратегии.

Эта книга предоставляет богатый набор микросценариев развития нанотехнологий, некоторые из них захватывающие, некоторые ужасающие, но все убедительные. Вероятно, ни один из этих сценариев не окажется абсолютно точным, но в совокупности они дают глубокое представление о том, что произойдет. Предлагаются стратегии того, как ускорить этот процесс, но конечная ответственность за безопасное развитие и использование нанотехнологий ложится на каждого человека, о чем надо знать. Теперь это касается и вас, читатели.

Стюарт Брэнд

Предисловие

Антибиотики, самолеты, спутники, ядерное оружие, телевидение, массовое производство, компьютеры, глобальная нефтяная экономика — все эти известные революции технологий двадцатого века с их растущими последствиями для жизни человека и самой Земли возникли на нашей памяти. Да, эти революции были великими, но следующие несколько десятилетий обещают гораздо большее. Новые перспективы не так очевидны и не могут быть понятными: они еще не произошли. Однако наша цель рассказать в этой книге о том, что мы можем наблюдать уже сейчас, не пытаться предсказывать события неизвестного и непонятного будущего, а обратить внимание на отчетливые и познаваемые возможности, которые сформируют то будущее, каким оно может стать.

Технологии двадцатого века отживают свое, им место в мусорной яме или, возможно, в мусорных баках. Они изменили нашу жизнь; новые, которые придут им на смену, снова изменят жизнь, но по-другому. В этой книге делается попытка проследить, хотя бы некоторые важные последствия грядущей революции, вызванной молекулярной нанотехнологией. Включая последствия для окружающей среды, медицины, рынка вооружений, промышленности, общества и жизни на Земле. Мы нарисуем картину появляющейся технологии — ее направлений, процессов и возможностей — но она станет всего лишь частью наступающего будущего.

Короче говоря, молекулярная нанотехнология, — это тщательный и недорогой контроль над структурой вещества. Загрязнение окружающей среды, физические болезни и материальная бедность — все это проистекает из-за плохого контроля над структурой вещества. Шахты, очистные сооружения, нефтеперерабатывающие заводы, бумажные фабрики и нефтяные скважины — вот некоторые из привычных технологий двадцатого века, которые будут заменены. Зубные сверла и токсическая химиотерапия — тоже.

Но, как всегда, есть обещание очевидной пользы, но есть и опасность злоупотребления. Как обычно, Соединенные Штаты отстают, потому что не интересуются будущим. Но наступили времена, когда предвидение становится необходимым и жизненно важным делом.

Техническое обоснование возможности создания молекулярной нанотехнологии я сделал в другой книге, и этот текст доступен ученым и инженерам с середины 1980-х годов.

Техническая библиография содержит ссылки и на другую литературу. Идея молекулярной нанотехнологии сейчас воспринимается примерно так, как идея полета на Луну в 1950 году до наступления космической эры, за девятнадцать лет до посадки «Аполлона-11» и за семь лет до запуска первого спутника. Те, кто знаком с теорией, ожидают, что это рано или поздно произойдет, но без финансирования со стороны правительства и без принятия Великого национального обязательства.

Наша цель — описать в этой книге, как молекулярная нанотехнология будет применяться на практике, чтобы как можно больше людей могли реалистично думать о будущем. Решения о том, как разрабатывать и контролировать мощные новые технологии, слишком важны, чтобы оставлять их на рассмотрение горстке узких специалистов. Или дожидаться поспешной политической реакции, которая возникнет, как это уже однажды случилось, после того, как полетел спутник. Политические решения, скорее всего, будут служить Общему Благу только при более глубоком понимании проблемы и после длительного обсуждения.

Я бы никогда не написал такую книгу самостоятельно, поскольку склонен к более абстрактным размышлениям. За все, что получилось, следует винить и благодарить моих соавторов Крис Петерсон и Гейл Пергамит. Благодаря им, книга стала реальностью, и кости технологии обрели плоть человеческих возможностей.

К. Эрик Дрекслер, Стэнфордский университет

Примечание автора

Многие из следующих глав сочетают реальные факты с описаниями из сценариев будущего, основанных на этих фактах. Факты и возможности сами по себе могут быть отвлеченными и не связанными с человеческими делами. Сценарии широко используются бизнес-стратегами для объединения фактов и возможностей в последовательные, жизненно важные картины. И мы используем их для этой цели. Сценарии отделяются от остального текста. В них встречаются рассказы о технологиях — то есть описание нашего понимания того, что может произойти. Любые упоминания о событиях, происшедших до 1991 года, есть рассказ о том, что уже произошло. А вот другие элементы сценариев добавлены для того, чтобы выстроить связную

историю. Но первые два абзаца в каждом сценарии описывают реальные факты, известные в 1990 году.

Глава 1
Взгляд в будущее

Японский профессор и его американский гость прогуливались под дождем по территории университетского городка, расположенного в пригороде Токио, недалеко от станции Хигасикоганеи. Они остановились возле внушительного бетонного здания.

— Это наш нанотехнологический центр, — сказал профессор Кобаяши.

Американский гость одобрительно покивал, но с грустью подумал, когда же что-то подобное появится в его стране?

Этот нанотехнологический центр был построен весной 1990 года, когда Эрик Дрекслер совершал напряженный восьмидневный тур по десяткам университетских лабораторий и научно-исследовательским центрам, обсуждая проблемы развития нанотехнологий. В том числе, он принял участие в симпозиуме по молекулярным машинам и нанотехнологиям, организованном Министерством международной торговли и промышленности (MITI). Поездку Дрекслеру оплатило Японское общество продвижения науки. Япония активно участвовала в развитии нанотехнологий, стремясь разработать «новые методы науки и техники в гармонии с природой и человеческим обществом», новую технологию для двадцать первого века.

Существует взгляд на будущее, отличный от тиражируемого СМИ. Подумайте об этом как об альтернативе, поворотном пункте будущей истории, который ведет в другой мир. В этом мире рак будет излечен, как сейчас полиомиелит, нефть перестанет быть основным источником энергии, как это произошло с китовым жиром, а промышленные технологии будут заменены, как это было сделано с кремневыми топорами. Все будет исцелено или заменено. Старые проблемы исчезнут, однако появятся новые: впереди много альтернативных миров, некоторые из них пригодны для жизни, а другие нет. Мы стремимся обследовать наш путь и возможные альтернативные варианты. Чтобы прийти к миру, пригодному для жизни, нам нужно лучше представлять, чего мы хотим достичь.

Как начать описывать технологию, которая может заменить привычную индустриальную систему мира? Физические возможности, тенденции исследований, технологии будущего, социальные последствия, политические вызовы — рассмотрение всех этих факторов представляется логичным, но ни один из них

не является самой главной отправной точкой. История может начаться с исследований в IBM, DuPont, с проектов ERATO в Tsukuba и RIKEN, но, скорее всего, начнется с молекул, казалось бы, далеких от человеческих проблем. В основе будущих преобразований лежит особая технология — «молекулярная нанотехнология» или «молекулярное производство». Именно она, по-видимому, заменит большую часть технологий, известных нам сегодня. Но не следует спешить. Кажется, лучше всего начать с общего описания возможных применений, кратко коснувшись тенденций развития технологий, которые они будут использовать, принципов, лежащих в их основе, и последствий их внедрения. А потом уже подробно описывать каждую из них.

Первая глава содержит именно такие предварительные наброски, что создаст основу для последующего подробного описания.

Можно рассматривать дальнейший текст, как попытку ответить на чрезвычайно важный вопрос из серии: «а что если?»

Что произойдет, если молекулярное производство и его продукты заменят современные технологии?

Если ничего не получится, то дальнейшее чтение окажется всего лишь развлечением и упражнением по тренировке ума. Но если современные технологии будут все-таки однажды заменены, то заблаговременное обсуждение возможных ответов способно оказать большое влияние на принятие решений, определяющих судьбу мира. В последующих главах будет показано, почему мы рассматриваем молекулярное производство как почти неизбежное событие. Но хорошим результатом для нас будет уже то, что какое-то количество людей просто задумается над вопросом: «А что, если»?

Кратко о технологиях

Молекулярная нанотехнология: тщательный и дешевый контроль за структурой вещества, основанный на манипулировании отдельными атомами и молекулами; продукты и процессы молекулярного производства.

Технология-как-мы-знаем — это совокупность методов и инструментов, используемых для промышленного и химического производства. Промышленность, как известно, берет исходные материалы из природы — руду из гор, деревья из лесов и превращает их в предметы, которые считаются полезными. Деревья становятся бревнами, затем домами. Горы превращаются в щебень, потом в расплавленное железо, потом в сталь, потом в автомобили. Из песка получают кремний, из которого производят чипы. Так оно и устроено. Каждый процесс является действием, основанным на резке, смешивании, нагревании, распылении, травлении, измельчении и тому подобном.

А вот деревья действуют по-другому. Они не режут, не измельчают, не смешивают, не нагревают, не шлифуют, не вытравливают. Вместо этого они аккумулируют солнечную энергию с помощью молекулярных электронных устройств, хлоропластов, способных осуществлять фотосинтетическую реакцию. Они используют эту энергию для приведения в действие молекулярных машин — активных устройств с движущимися частями точной молекулярной структуры, которые перерабатывают углекислый газ и воду в кислород и молекулярные строительные блоки. Они используют другие молекулярные машины, чтобы соединить эти молекулярные строительные блоки и сформировать корни, стволы, ветви, листья и другие молекулярные машины. У каждого дерева вырастают листья, и каждый лист является более сложным продуктом, чем космический корабль, с более тонким рисунком, чем у самого лучшего чипа из Силиконовой долины. Они делают все это без шума, не выделяя тепла и токсичных газов, не используя человеческий труд. И, кроме того, они потребляют при своей работе вредные вещества. С этой точки зрения деревья — это высокие технологии. А чипы и ракеты — нет.

Пример деревьев показывает, как может действовать нанотехнология. Однако нанотехнология отличается от биотехнологии, потому что не занимается изменением живых существ. Биотехнология является одним из способов одомашнивания живых существ. Как и селекция, она изменяет генетический материал вида, чтобы добиваться полезных для

людей свойств. Но в отличие от селекции, она добавляет новые гены. Нанотехнология будет использовать молекулярные машины, как биотехнология и обычные деревья, но в отличие от них, не станет вмешиваться в генетический код. Так что речь идет не о дальнейшем развитии биотехнологии, а об альтернативе ей и последующей замене.

Молекулярная нанотехнология могла быть задумана и проанализирована — хотя этого и не произошло — на основе научных знаний, доступных еще сорок лет назад. Даже сегодня, когда развитие технологий ускоряется, понимание растет медленно, потому что молекулярная нанотехнология объединяет области, которые ранее были далеки друг от друга: молекулярные науки, работающие на грани с квантовой механикой, и машиностроение, все еще использующее обычные грубые технологии. Нанотехнология будет представлять собой технологию новых молекулярных машин, шестерен, валов и подшипников, которые перемещаются и работают с деталями, сформированными в соответствии с волновыми уравнениями квантовой механики. Инженеры-механики не проектируют молекулы. Молекулярные ученые редко проектируют машины. Тем не менее, новая область производства будет расти — растет и сегодня — в их совместной работе. Нанотехнология заменит и химию, какой мы ее знаем, и привычное машиностроение. Но что такое современное технология и производство, как не лоскутное одеяло примитивной химии и примитивных машин?

В главе 2 будет представлено подробное описание молекулярных машин и молекулярного производства, но пока рассмотрим простую аналогию. Представьте себе автоматизированную фабрику, полную компьютеров, движущихся конвейерных линий и вращающихся манипуляторов. Теперь вообразите себе что-то вроде этой фабрики, но в миллион раз меньше, которая работает в миллион раз быстрее, с инструментами и заготовками молекулярного размера. На этой фабрике «отходами» будет считаться отдельная молекула, как будто лишний болт или шайба, это ее будут отбрасывать, если она не понадобится. Во многих отношениях подобная фабрика будет совершенно не похожа на живую клетку: жидкую, гибкую, адаптируемую и плодородную, напротив, она будет жесткой, программируемой и специализированной. И все же, несмотря на это, микроскопическая молекулярная фабрика сможет точно производить молекулярные конструкции.

Будущее молекулярное производство сможет изготовить практически все, что угодно. В отличие от грубых механических и химических технологий, молекулярное производство будет

работать снизу вверх, собирая сложные продукты из молекулярных строительных деталей, которые в физическом мире лежат в основе всего.

Нанотехнологии откроют перед нами дополнительные возможности, предоставив новые способы производить вещи, исцелять наши тела и заботиться об окружающей среде. Конечно, это приведет к нежелательному прогрессу в производстве вооружений и создаст еще больше способов погубить наш мир самым неприятным образом. И не решит автоматически наши проблемы: даже самые мощные технологии всего лишь дают нам больше возможностей. Как всегда, у нас впереди много работы и много трудных решений, которые мы должны принять, если надеемся использовать новые разработки в благих целях. Главная причина, зачем нам следует уже сейчас обратить внимание на нанотехнологию, до того как она будет создана, — это попытаться понять ее и решить, как ее использовать.

Немного о последствиях

Как известно, люди в Соединенных Штатах одержимы выборами в следующем году и прибылью в следующем квартале, остальное, все, что может произойти когда-нибудь потом, их мало интересует. Тем не менее, мы пишем для нормальных людей, которые чувствуют, что будущее имеет значение — пусть и через десять, двадцать, возможно, даже тридцать лет — для людей, которые думают о том, какой станет их жизнь в будущем, чтобы иметь шансы изменить ее к лучшему. Принятие мудрых решений с прицелом на будущее требует адекватного понимания того, каким оно может стать. Что делать, если сейчас большинство представлений о будущем основано на неверных предположениях?

Перечислим некоторые из них. Большинство настолько привычны, что кажутся очевидными:

— промышленное развитие является единственной альтернативой бедности;

— большинство людей должны работать на заводах;

— чем больше потребление ресурсов, тем вы богаче;

— лесозаготовки, добыча полезных ископаемых и сжигание ископаемого топлива должны продолжаться;

— производство обязательно приводит к загрязнению окружающей среды;

— развитие третьего мира обречет окружающую среду на гибель.

Все это вытекает из главного фундаментального предположения:

— промышленность, какой мы ее знаем, останется прежней.

А вот еще предположения:

— в двадцать первом веке ничего не изменится;

— сегодняшние экономические тенденции определят завтрашние проблемы;

— космический полет никогда не будет доступным для большинства людей;

— леса никогда не вырастут за пределами Земли;

— более продвинутая медицина всегда будет дороже;

— даже высокоразвитая медицина не сможет сохранить здоровье людей;

— солнечная энергия никогда не станет по-настоящему дешевой;

— токсичные отходы никогда не будут собраны и уничтожены;

— используемая земля никогда не будет возвращена в дикую природу;

— никогда не будет оружия хуже ядерных ракет;

— загрязнение окружающей среды и истощение ресурсов в конечном итоге приведет к войне или краху.

Эти банальные предположения рисуют будущее, полное ужасных проблем. А представление о том, что избежать их нам позволят технологические изменения, предполагает, что некоторые из них могут спасти нашу промышленную систему. Перспектива, однако, совсем другая: промышленная система не будет исправлена, она будет отброшена и заменена другой. Перспектива ее развития вовсе не в том, чтобы вырвать из плоти Земли как можно больше ресурсов для развития промышленности, а в зеленом богатстве, получаемом с помощью экологически чистых процессов, подобных тем, которые использует растущее дерево. Современные промышленные технологии заставляют нас выбирать лучшее качество или более низкую стоимость, или большую безопасность, или более чистую окружающую среду. В то время, как молекулярное производство может быть использовано и для улучшения качества, и для снижения затрат, а также для повышения безопасности и очистки окружающей среды. Грядущие технологические революции преодолеют многие из старых, привычных проблем. И да, они принесут новые, не менее страшные проблемы.

Молекулярная нанотехнология обеспечит тщательный и недорогой контроль за структурой вещества. Необходимо разобраться в особенностях молекулярной нанотехнологии, чтобы понять будущие возможности человечества. Это поможет нам увидеть предстоящие проблемы и спланировать наилучшие пути сохранения ценностей, традиций и экосистем с помощью эффективной политики и соответствующих институтов. Кроме того, это может помочь нам понять, как будут развиваться текущие события, включая возможности для ведения бизнеса. Нам нужно видеть, куда ведет развитие технологии, потому что технология является частью человеческого существования, и ее изменение повлияет на то, каким станет в будущем общество, и какими станут люди. Последствия грядущих революций будут зависеть от действий человека. Как всегда, новые способности создадут новые возможности, как для чего-то хорошего, так и для плохого. Мы обсудим и то, и другое, сосредоточив внимание на том, как лучше всего использовать политическое и экономическое давление для достижения благих целей. Наши ответы не будут всеобъемлющими, но они, по крайней мере, начнут необходимое обсуждение.

Кратко о тенденциях

Технология стремилась к большему контролю над структурой вещества на протяжении тысячелетий. В последние десятилетия микротехнология строила все более мелкие устройства, пытаясь приблизиться к молекулярному масштабу. Уже больше столетия химия строит все более крупные молекулы, стараясь сделать их достаточно большими, чтобы использовать как машины. Исследования носят глобальный характер, и конкуренция обостряется. И вот впервые была сформулирована концепция молекулярной нанотехнологии, ученые значительно расширили свои возможности в области химии и молекулярных операций (см. главу 4). Появилось более четкое понимание того, как эти возможности могут объединиться на следующих этапах (см. главу 5), и как может работать современное молекулярное производство (см. главу 6). Нанотехнология появилась как идея и как направление исследований, хотя еще не стала реальностью.

Естественные молекулярные машины уже существуют. Исследователи учатся создавать новые. Тенденция ясна, и она будет развиваться дальше, потому что лучшие молекулярные машины помогут построить еще более совершенные молекулярные машины. По меркам повседневной жизни развитие молекулярной нанотехнологии будет постепенным, охватывающим годы или десятилетия, но с точки зрения человеческой истории это произойдет в мгновение ока. Оглядываясь назад, можно с уверенностью сказать, что массовая замена технологий двадцатого века станет технологической революцией, процессом, обеспечивающим большой прорыв в производстве. Сегодня мы живем в конце отживающей эпохи, с устаревшими технологиями, мечтами, страхами и заботами, которые нам пока кажутся вечными, как и холодная война. И все же есть надежда, что эпоха прорыва — это дело не какого-то будущего поколения, а уже нашего. Эти события происходят прямо сейчас, и было бы опрометчиво предполагать, что их последствия будут отсрочены на многие годы.

В последующих главах мы подробнее расскажем о том, что делают исследователи сегодня, о том, к чему приведет их работа, а также о неизбежных проблемах и выборе, который предстоит сделать. Однако, чтобы получить представление о последствиях, нам следует лучше понимать, на что способна нанотехнология. Не исключено, что это будет не легко, потому что прошлые передовые технологии — микроволновые трубки, лазеры, сверхпроводники, спутники, роботы и тому подобное — были

созданы на заводах, и были сначала дорогими, а их область применения была ограничена. Молекулярное производство будет больше похоже на изготовление компьютеров: гибкая технология с огромным спектром применения. К тому же молекулярное производство не будет связано с привычными заводами, как это было с компьютерами. Способ производства изменится, и продукты будут изготовляться совсем другие. Это что-то новое и фундаментальное, а не просто еще один гаджет двадцатого века. Нанотехнология возникнет из тенденций развития науки двадцатого века, но породит совсем другие принципы развития технологии, экономики и экологии.

Другие последствия: сцены из постпрорывного мира

Мы не можем предсказать, какую роль будут играть нанотехнологии в человеческой жизни, это не поддается точному прогнозированию, но в наших силах рассмотреть возможные сценарии развития технологий и оценить последствия их внедрения. Хороший сценарий объединяет различные аспекты будущего (технологии, окружающую среду, человеческие проблемы) в единое целое. Крупные корпорации используют подобные сценарии, чтобы представить возможные пути развития своего бизнеса. Не как точный прогноз, а как основу для размышлений. В нашей игре «что, если?» сценарии не только дают пробные ответы, но и ставят новые вопросы.

Сценарии, которые мы рассмотрим, не утверждают, что все произойдет именно так. Этого никто не знает. Однако они способны показать, как постпрорывные технологии могут изменить человеческую жизнь и экологию Земли. С точки зрения ожидающего нас будущего результаты, вероятно, могут показаться излишне консервативными. А ведь для нас сегодня даже они представляются научной фантастикой. Подробнее вопросы, стоящие за этими сценариями, будут рассмотрены в последующих главах.

Сценарий: «Солнечная энергия»

Фэрбенкс, Аляска. Темным зимним утром Линда Гувер просыпается и, зевая, щелкает выключателем. Свет загорается, приведенный в действие сохраненным солнечным электричеством. Нефтепровод Аляски закрылся много лет назад, и доставка нефти с помощью танкеров навсегда прекращена. Нанотехнологии могут сделать солнечные батареи эффективными, дешевыми как газета, и твердыми как асфальт — достаточно твердыми, чтобы использовать их для покрытия дорог, где они и будут собирать энергию, не отнимая больше место у травы и деревьев. Вместе с эффективными, недорогими аккумуляторами это даст недорогую энергию (но нет, не «слишком дешевую для измерения»). Перспективы развития энергетики и окружающей среды подробно рассматриваются в главе 9.

Сценарий: «Лекарство, которое лечит»

Линкольн, штат Небраска. Сью Миллер несколько недель ходила с охрипшим горлом, как будто подхватила жуткий насморк. Через полгода она наконец-то увидела рекламу лекарства от простуды, поэтому потратила пять долларов и начала лечиться с помощью спрея для носа и горла. В течение трех часов 99 процентов вирусов в ее носу и горле были уничтожены, а остальные больше не представляли опасности. Уже через шесть часов медицинские препараты распались, стали чем-то вроде щепотки биоразлагаемой пыли, от которой организм вскоре избавился. Она почувствовала себя намного лучше и была уверена, что не заразит своих друзей за ужином.

Иммунная система человека представляет собой сложный молекулярный механизм, защищающий организм от вирусов и других захватчиков, распознавая их по чужеродным молекулярным оболочкам. Но она, однако, медленно распознает что-то новое. За свои пять долларов Сью купила 10 миллиардов молекулярных механизмов, способных распознать не только вирусы, с которыми они уже сталкивались, но также еще пятьсот наиболее распространенных вирусов, вызывающих простуду, грипп и тому подобные заболевания.

Прошли недели, но хрипота, которая была у Сью еще до того, как она простудилась, так и не прошла; более того, стала сильнее. В течение долгого времени Сью не обращала на нее внимания, но когда болезнь вернулась, Сью, наконец, пошла к своему врачу. Он осмотрел ее горло, попросил вдохнуть аэрозоль, откашляться, сплюнуть в чашку и пойти почитать журнал. Уже через пять минут после того, как он вставил образец в свой клеточный анализатор, на экране появился диагноз. Несмотря на свой опыт, знания и доступное ему медицинское оборудование, он испытал неприятное чувство, ознакомившись с диагнозом: злокачественный рак горла, заболевание, которое слишком часто возникало в семье его собственной матери.

Доктор нажимает кнопку «Продолжить». Через двадцать минут, он смотрит на монитор, чтобы проверить результат анализа. Да, раковые клетки Сью относятся к одному из 16314 известных молекулярных видов злокачественности. Они распознаны, и поэтому могут быть уничтожены стандартными молекулярными машинами, реагирующими на каждый вид рака. Врач поручает клеточному анализатору запустить некоторые «иммунные машины», которые должны уничтожить ее раковые клетки. Он проверяет, как они работают на клетках из образца, наблюдает и видит, что все идет, как следует, поэтому он

активирует анализатор. Сью откладывает журнал.

— Ну, Док, что скажете? — спрашивает она.

— Я нашел несколько подозрительных клеток, требуется небольшое исследование, — отвечает он и впрыскивает ей в горло спрей. — Я бы хотел, чтобы вы вернулись через три недели, просто чтобы быть уверенным в том, что все хорошо.

— Это обязательно? — спрашивает она.

— Нам нужно убедиться, что злокачественные клетки исчезли. Не следует позволять таким процессам заходить слишком далеко.

— Хорошо, я запишусь на прием, — говорит она.

Покидая офис, Сью с нежностью думает о том, насколько старомоден и консервативен доктор Фудзима.

Молекулярные механизмы иммунной системы разрушают большинство потенциальных раковых заболеваний еще до того, когда их можно обнаружить. С помощью нанотехнологий мы создадим молекулярные механизмы, способные уничтожить те из них, которые иммунная система пропускает. В главе 10 более подробно рассматриваются медицинские нанотехнологии.

Сценарий: «Очищение почвы»

Калифорнийский скаутский отряд 9731 шесть дней шел пешком по диким лесам Тихоокеанского Северо-Запада.

— Держу пари, мы первые люди, которые пришли сюда, — сказал один из самых молодых скаутов.

— Ну, может быть, ты и прав, не исключено, что пешком мы добрались сюда первыми, — ответил скаутмастер Джексон. — Но посмотрите вон туда. Что вы видите, скауты?

В двадцати шагах впереди виднелась полоса молодых деревьев, она тянулась влево и вправо, а потом скрылась среди стволов окружающего леса.

— Эй, ребята! Это же еще одна старая лесовозная дорога! — кричит старший скаут.

Несколько скаутов достают из карманов зонды и прикрепляют их к концам своих палок. Джексон улыбается: прошло уже десять лет с тех пор, как Калифорнийский отряд нашел что-то таким образом, но дети продолжают искать. Разведчики расходятся веером, прокладывая себе путь вдоль старой дороги, ковыряясь в земле и следя за показаниями зондов. Вдруг, неожиданно, раздается сигнал:

— Ух ты, у меня есть сигнал!

И вот уже довольные разведчики составляют карту и

отслеживают разлив вредных веществ. Несколько десятилетий назад грузовик с протекающим грузом химических отходов двигался по старой лесной дороге и оставил тонкий токсичный след. Эта тропа привела их к глубокому оврагу, нескольким ржавым железякам и большому участку, покрытому невидимой грязью. Волнение нарастает.

Отложив карты и обычные способы ориентирования, они устанавливают спутниковую антенну, чтобы установить точную широту и долготу места, а затем отправить сообщение, регистрирующее их заявку на химическую очистку в овраге. После чего отправляются домой, с нетерпением планируя вернуться, чтобы заработать такой редкий теперь знак отличия по очистке токсичных отходов.

Сегодня лесные фермы заменяют дикую природу. Завтра может начаться медленное возвращение дикой природы. Наступят времена, когда природа больше не будет рассматриваться как источник природных ресурсов, которые нужно разграбить. В главе 9 будет обсуждаться, что сделать людей богатыми, можно и, не забирая слишком много у природы, и как постпрорывные технологии помогут удалить токсичные следы ошибок двадцатого века.

Сценарий: «Карманные суперкомпьютеры»

Исследователь Мичиганского университета Джоэл Грегори захватывает молекулярную цепочку обеими руками своего манипулятора и поворачивает ее. Пока ничего не получается, красная рябь указывает на слишком большое напряжение в нижней ее части. Он добавляет два атома и снова поворачивает цепочку. Цвет меняется от зеленого к синему, это намного лучше. Джоэл снова захватывает молекулярную цепочку механической рукой, конструированием которой занимается, повышает температуру и заставляет ее двигаться. Миллионы атомов колеблются, подчиняясь тепловой вибрации, шестеренки вращаются, а рука совершает запрограммированные движения. Выглядит неплохо. Некоторые детали манипулятора пока еще не готовы, но завершение диссертации требует времени, и он намерен поработать над остальными молекулярными деталями позже. Джоэл снимает очки и перчатки, соединенные с компьютерным монитором и моргает, возвращаясь в реальный мир. Пришло время для бутерброда и чашки кофе. Он берет компьютер, засовывает его в карман и направляется в студенческое кафе.

Исследователи уже используют компьютеры для построения моделей молекул. Появляются «системы виртуальной реальности», позволяющие пользователю передвигаться по изображению молекулы и «трогать» ее, используя управляемые компьютером перчатки и очки. Мы пока не можем построить суперкомпьютер, способный смоделировать машину из миллиона атомов, и, тем более, карманный суперкомпьютер, но компьютеры продолжают дешеветь и уменьшаться в размерах. С нанотехнологиями, используя молекулярные цепочки, такие, как у Джоэла, суперкомпьютер можно будет построить легче. Сегодняшние суперкомпьютеры по сравнению с ним покажутся ручными арифмометрами. В главах 2 и 3 подробнее рассматривается моделируемый молекулярный мир.

Сценарий: «Глобальное богатство»

За деревенской школой, в лесу, в двух шагах от реки Конго, в мусорном баке лежит настольный компьютер, мощность которого в тысячу раз превышает мощность суперкомпьютера начала 1990-х годов. В помещении Джозеф Адула и его друзья закончили свои дневные занятия; теперь они играют вместе в яркой игровой вселенной, используя персональные компьютеры, каждый из которых в миллион раз мощнее, чем драндулет в мусорном баке. Обстановка комфортная, работает кондиционер. Ребята задержались допоздна.

Деревья используют воздух, почву и солнечный свет для того, чтобы вырасти, поэтому дерево достаточно дешево, чтобы использовать его даже для обогрева. Нанотехнологии могут делать то же самое, создавая продукты такими же дешевыми, как древесина — даже такие продукты, как суперкомпьютеры, кондиционеры и солнечные батареи для их питания. В результате экономика может сохранить тропические леса от уничтожения в печке. В главе 7 будет обсуждаться, как затраты могут упасть достаточно низко, чтобы сделать материальное богатство для третьего мира легко достижимым.

Сценарий: очищение воздуха

Подъем уровня углекислого газа в атмосфере Земли, как это происходило в двадцатом веке, остановился и обратился вспять. Ископаемые виды топлива устарели, поэтому уровень загрязнения снизился. Эффективное сельское хозяйство освободило

плодородные земли для восстановления лесов, поэтому растущие деревья очищают атмосферу. Избыток солнечной энергии от солнечных батарей, которыми во всем мире покрыты дороги, используется для того, чтобы перерабатывать избыток углекислого газа, а это 5 млрд. тонн в год. Климат возвращается к норме, моря отступают к своим историческим берегам, а экосистемы начинают медленный процесс восстановления. В последующие двадцать лет, атмосфера вернется к доиндустриальному состоянию, какой она была в 1800 году. В главе 9 будет обсуждаться экологическая очистка атмосферы. А это и сокращение источников загрязнения и очистка от уже совершенных выбросов.

Сценарий: Транспортировка в космос

Вылет дневного рейса Джима Салина из аэропорта Даллеса задерживается. Джим нетерпеливо посмотрел на часы: еще немного, и он опоздает сделать запланированную пересадку. Наконец, лайнер с зеркальной поверхностью катится по взлетно-посадочной полосе. С помощью крыльев он поднимает свое массивное тело и круто устремляется на восток. Джим читает роман и отрывается только на прослушивание инструкции по технике безопасности и сообщение капитана о том, что он попытается наверстать упущенное время. Джим откидывается на спинку сиденья, когда включаются главные двигатели, крылья убираются, ускорение нарастает, и небо темнеет до черноты. Как и самые высокопроизводительные ракеты 1980-х годов, лайнер Джима выбрасывает чистый водяной пар. Космические полеты стали безвредными, безопасными и рутинными. И каждый год все больше людей отправляется в космос, чем спускается потом на Землю.

Большую часть стоимости полета составляет оплата высокопроизводительного, надежного оборудования. Аэрокосмические структуры будут созданы из почти безупречных, сверхпрочных и дешевых материалов с помощью молекулярного производства. Добавьте недорогое топливо, и космос станет доступнее. В главе 8 обсуждаются перспективы освоения мира за пределами Земли.

Сценарий: «Восстановление видов»

Церемонии Дня восстановления — это всегда очень

трогательные события. Почему-то старики плачут, хотя и говорят, что счастливы. Плакать, думает Трейси Стиглер, не имеет никакого смысла. Она снова наблюдает на мониторе с помощью скрытой камеры за песчаным пляжем, расположенным на полуострове Юкатан в Карибском море. Скоро там все снова изменится к лучшему.

Трейси и другие ученые из «BioArchive» занимают почетное место в сегодняшней церемонии Дня восстановления. С середины двадцатого века на Юкатане не было живых карибских тюленей-монахов, лишь в музее остались жуткие реликвии прошлых лет — остатки мертвых особей: тюленьи меха и высохшие чучела. Команда Трейси боролась за их возвращение в течение многих лет, собирая эти реликвии и изучая их с помощью молекулярных инструментов. На протяжении десятилетий — с 1980-х годов — было известно, что гены достаточно устойчивы, чтобы выжить в высушенной коже, костях, рогах и яичной скорлупе. Команда Трейси собрала гены и восстановила клетки. Они работали годами и благодаря бережному отношению — запоздалому, но усердному — спасли один вымерший вид. Наконец, гавайский тюлень-монах родил генетически чистого карибского тюленя-монаха, близнеца давно умершего тюленя. А теперь их стало пятьсот, некоторые молодые, некоторые среднего возраста, с приличным генетическим разнообразием и пятилетним опытом жизни в пределах прибрежной экологической станции.

Сегодня, они своими хриплыми голосами возвещают, что возвращаются в дикий мир, чтобы занять свою экологическую нишу. Пока Трейси слушает звуки, издаваемые тюленями-монахами, она думает о голосах, которые никто никогда больше не услышит: о видах, известных и неизвестных, которые не сохранили даже кровавого клочка, чтобы оставить надежду на восстановление. Тысячи или миллионы? Некоторые виды вымирали, поскольку их места обитания уничтожались земледелием и лесозаготовками. Люди знали — в течение многих лет знали — что замораживание или сушка спасут гены. Они знали об экологической катастрофе, которую сами и устроили, знали, что не остановили ее. Но эти невежественные уроды даже не позаботились сохранить образцы. Трейси замечает, что тоже плачет на церемониях Дня восстановления.

Люди, несомненно, будут стремиться, как можно быстрее, развивать биомедицинские приложения нанотехнологий для поддержания здоровья человека. При определенном желании эта технологическая база может быть с успехом использована для восстановления некоторых видов, которые сейчас считаются потерянными навсегда. Это значит, что удастся исправить, хотя

бынемного, тот урон, который люди нанесли паутине жизни. Конечно, было бы лучше сохранить экосистемы и виды в первоначальном состоянии, но восстановление даже нескольких видов все-таки намного лучше, чем ничего. Некоторые образцы исчезающих видов хранятся сегодня, но в недостаточном количестве и в основном по другим причинам. В главе 9 будет более подробно рассмотрено восстановление экосистем и перспективы действий, предпринимаемых сегодня.

Сценарий: Нестабильная гонка вооружений

Споры по вопросам развития технологий и торговли испортили отношения между Сингапуром и японо-американским союзом. Дипломатические запросы по поводу тревожных сейсмических и гидроакустических данных, полученных в Южно-Китайском море, только начались, когда они внезапно стали неактуальными: по оценкам, один миллиард тонн незнакомой, высокоавтоматизированной военной техники появилось в прибрежных водах по всему миру. Конгресс и персонал «PeaceWatch» обменялись взаимными обвинениями: «если бы вы сделали свою работу» — «если вы позволите нам делать нашу работу». В конце февраля Сингапур превратился в военную сверхдержаву. Низкая стоимость, высокое качество и простота производства могут быть применены для многих целей, не все из них привлекательные. Нанотехнологии имеют огромный потенциал для злоупотреблений.

Технологии пересмотрены

Молекулы имеют значение, потому что вещество состоит из молекул, а все, от воздуха до человеческой плоти и космических кораблей, состоит из вещества. Когда мы узнаем, как управлять молекулами по своему усмотрению, мы сможем создавать новые вещи и делать старые вещи по-новому. Возможно, именно поэтому японская MITI определила «технологии управления для точного расположения молекул» как главную промышленную задачу двадцать первого века. Молекулярная нанотехнология даст полный контроль над веществом в больших масштабах при низких затратах, разрушая множество технологических и экономических барьеров практически одним ударом.

Молекула — это объект, состоящий из набора атомов, удерживаемых вместе сильными связями (одноатомные молекулы являются частным случаем). «Молекулой» обычно называют объекты с числом атомов, достаточно малым, чтобы быть подсчитанным (до нескольких тысяч), но, строго говоря, шина грузовика (например) — это в основном одна большая молекула, содержащая что-то около 1 000 000 000 000 000 000 000 000 атомов. Подсчет этого количества атомов вслух займет около 10 000 000 000 миллиардов лет.

Ученые и инженеры до сих пор не имеют прямого и удобного способа управления молекулами, в основном потому, что человеческие руки примерно в 10 миллионов раз больше их. Сегодня химики и материаловеды создают молекулярные структуры опосредованно, смешивая, нагревая и совершая другие подобные действия. Идея нанотехнологии начинается с создания молекулярного ассемблера, устройства, напоминающего руку промышленного робота, но исполненного в микроскопическом масштабе. Общецелевой молекулярный ассемблер будет механизмом, собранным из твердых молекулярных деталей, управляемым моторами, контролируемым компьютерами, и способным схватить и переместить объекты молекулярного масштаба. Молекулярные ассемблеры могут быть использованы для создания других молекулярных машин — в том числе и других молекулярных ассемблеров. Ассемблеры и другие машины в молекулярных производственных системах смогут сделать почти все, если получат необходимое сырье. По сути, молекулярные ассемблеры — это микроскопические «руки», которых нам сегодня не хватает. (Химиков просят простить это литературное описание; конкретные детали молекулярного взаимодействия и связей не меняют сути дела).

Нанотехнологии позволят лучше контролировать молекулярные строительные блоки, то, как они двигаются и соединяются, чтобы сформировать более сложные объекты. Молекулярное производство будет создавать вещи, строя снизу вверх, начиная с самых маленьких возможных строительных блоков. Нано в нанотехнологии происходит от nanos, в переводе с греческого — карлик. В науке приставка нано означает одну миллиардную часть чего-то. Например, нанометр и наносекунда — типичные единицы измерения расстояния и времени в мире молекулярного производства. Когда вы видите, что «нано» прикреплено к названию объекта, это означает, что объект сделан путем соединения вещества с молекулярным управлением: наномашина, наномотор, нанокомпьютер. Это самые маленькие, самые точные устройства, которые могут быть сделаны на основе современной науки.

Некоторые исследователи используют добавку нано для обозначения других небольших технологий, применяемых в лаборатории. К этому нужно относиться с осторожностью. В этой книге нанотехнологией называют реальную молекулярную нанотехнологию будущего, в то время как британские ученые применяют термин к мелкомасштабным и высокоточным современным технологиям, даже к точному измельчению и измерению. Последние полезны, но вряд ли революционны.

Цифровая электроника произвела революцию, управляемо обрабатывая информацию в идеальном, дискретном виде: битах и байтах. Точно так же нанотехнология принесет революцию в обработке вещества, быстро и контролируемо обрабатывая его в идеальном, дискретном виде: атомах и молекулах. Цифровая революция сосредоточилась на создании устройства, способного использовать биты в удобном виде: это программируемый компьютер. Точно так же нанотехнологическая революция будет сосредоточена на использовании устройства, способного создавать (почти) любую желаемую структуру атомов: программируемом ассемблере. Технологии, которые досаждают нам сегодня, страдают от состояния и износа старой пластинки. Нанотехнологии, напротив, принесут четкое, цифровое совершенство компакт-диска.

Дорожная карта

Следующие два раздела немного подробнее расскажут о том, почему нанотехнологии уже сейчас стоят вашего внимания и можно ли что-то понять о наступающем будущем, обсуждая их особенности. В последующих главах даются ответы на следующие вопросы:

— Кто занимается нанотехнологиями? Что они делают, и почему?

— Можно ли объединить их усилия, чтобы обеспечить прорывные исследования? Когда это может произойти? За какими событиями мы должны следить?

— Как будут работать нанотехнологии? Кто сможет ими воспользоваться?

— Что это будет означать для экономики? Для медицины? Для окружающей среды?

— Каковы риски? Какие основные правила нам понадобятся? Что это будет означать для глобальной гонки вооружений?

— Что может пойти не так, когда эта технология появится, и что мы можем предпринять?

В демократическом обществе лишь немногим людям необходимо глубоко разбираться в том, как работает технология, но остальные должны понимать, что она может сделать. Следующую главу мы начнем с описания молекулярного мира и того, как он работает. В конце концов, все вокруг нас и внутри нас состоит из молекул. А потом продолжим обсуждением того, что эта технология будет означать для людей и биосферы.

Зачем об этом говорить?

Именно эти проблемы — обсуждение последствий нанотехнологий для нашей жизни, окружающей среды и будущего — побудили нас написать эту книгу. Нанотехнология может привести к важным достижениям и решить серьезные проблемы, но она также может привести к огромным злоупотреблениям. Научно-исследовательский прогресс необходим, но нельзя забывать об информировании и предупреждении общественности.

Наша мотивация проста — это в равной степени страх перед потенциальным вредом и желание избежать его, а также стремление к потенциальному благу и желание достичь его. Тем не менее, мы будем в основном говорить о том благе, которое могут принести нанотехнологии, и лишь немного об очевидном потенциальном вреде. Предстоящей технологической революцией лучше всего смогут управлять люди, которые разбираются не только в том, чего они хотят избежать, но и в том, чего они могут достичь. Если у нас, как у членов общества, есть четкое представление о маршруте следования, нам не понадобится точная карта, где бы указывалось положение каждого утеса и минного поля на обочине дороги.

Некоторые читатели отметят нашу склонность к описанию положительных последствий будущих изменений и назовут нас оптимистами. Но разве было бы разумно подробно рассказывать о том, как именно можно злоупотреблять технологиями? Или, может быть, даже подсказать, как это сделать?

Тем не менее, сидеть за столом, готовясь рассказать эту историю, — не самое приятное занятие для исследователя. В своей книге «Как суеверие победило, а наука проиграла» историк Джон К. Бернем рассказывает о столетнем отступлении ученых. Когда-то они считали своей обязанностью знакомить широкую аудиторию с методами и достижениями науки, которые должны использоваться для общественного блага. Сегодня ученые имеют смутное представление о популяризации.

Если вы умеете излагать свои мысли на простом английском языке, это считается доказательством того, что вы не способны использовать математику, и наоборот. Роберт Пул, сотрудник отдела новостей самого престижного американского научного журнала «Science» признает это негативное отношение к популяризации: «Некоторые исследователи, либо по своему выбору, либо просто оказавшись в неудачном месте в неудачное время, только подтверждают это общественное мнение». Как исследователь может избежать подобных обвинений? Если вы

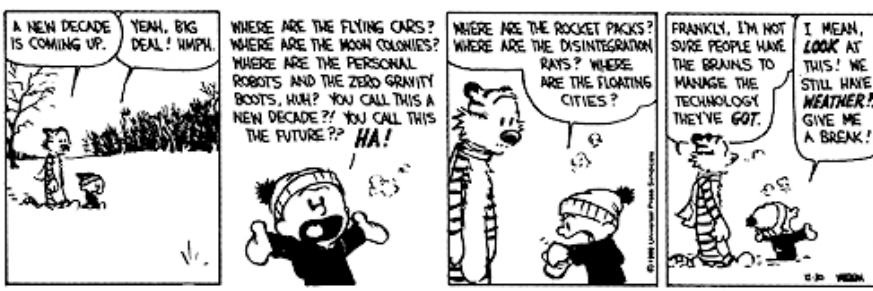
наткнетесь на что-то важное, пользуйтесь профессиональным жаргоном. Если люди догадаются, что вы говорите что-то важное, бегите и прячьтесь. Роберт Пул мягко призывает ученых к более активному обсуждению научных достижений с общественностью, но социальное давление в исследовательском сообществе склоняет к противоположному поведению.

В ответ на негативное отношение к популяризации мы можем лишь попросить ученых и инженеров при оценке того или иного предложения действовать сугубо профессионально, то есть уделять скрупулезное внимание научно-техническим фактам. Это означает, что оценка обоснованности технических идей должна основываться на их фактических достоинствах, а не на стиле изложения (в популярной статье) или на эмоциональной реакции, которую они могут вызвать. Нанотехнологии важны для людей, которые заслуживают, чтобы их предупредили об их последствиях и влиянии на общество и природу. Мы настоятельно призываем читателей, имеющих отношение к науке, ознакомиться с технической библиографией в конце книги, а затем указать на любые серьезные ошибки, которые они могут найти в технических статьях по этой теме. Мы призываем неспециалистов, которые встречаются с хорошо осведомленными научными критиками, требовать конкретного технического обоснования. Мы обсудим некоторые критические замечания в главе 3. Многолетние дискуссии с учеными и инженерами — на встречах, в частном порядке, на конференциях и через прессу — свидетельствуют о том, что аргументы в пользу нанотехнологий убедительны. Японская и европейская промышленность, правительства и академические исследователи продвигаются вперед по пути создания нанотехнологий, и все больше и больше таких исследований проводят в США. Некоторые исследователи даже стали называть это своей главной целью.

Слова, блокирующие мышление

Американцы, так часто находящиеся на переднем крае науки и техники, испытывают любопытные трудности в размышлениях о будущем. Язык, кажется, имеет к этому прямое отношение.

Как только речь заходит о будущем, мы называем такой разговор «футуристическим». Если это не останавливает собеседника, мы говорим, что это «звучит как научная фантастика». Эти термины напоминают слушателям о смехотворных фантазиях 1950-х годов, таких как полеты на Луну, видеотелефоны, лучевые пушки, роботы и тому подобные изобретения. Конечно, все это стало реальностью в 1960-х годах, потому что наука не была пустой фантазией. Сегодня мы можем говорить не только о том, как создавать новые научно-фантастические устройства, но, что более важно, как сделать их дешевыми и доступными. Нужно думать о будущем, и обидные ярлыки помочь нам в этом не способны.



Серьезная проблема. (Кальвин и Гоббс. Copyright (R) 1989 от Universal Press Syndicate. Перепечатка с разрешения автора. Все права защищены)

Любопытно, что в японском языке, похоже, отсутствует пренебрежительное слово для обозначения «будущего». Идеи для будущих технологий могут быть названы mirai no («о будущем», надежда или цель), *sh*****rai-teki* (ожидаемое развитие, которое может быть осуществлено через двадцать лет) или *k*****s***** no («воображаемое», потому что противоречит физическому закону или экономике). Когда мы думаем о будущем, нужно отличать mirai no и *sh*****rai-teki,* так можно сказать о нанотехнологиях, от *k*****s**** no, что употребляется по отношению к чему-то подобному антигравитационным ботинкам.

Последнее возражение — это утверждение, что нет смысла

пытаться думать о будущем, потому что это чересчур сложно и непредсказуемо. Это слишком общее высказывание, в чем-то правдивое, но принципиально важное. Оно заслуживает обдуманного ответа.

Трудность смотреть вперед

Если в будущем будут использоваться нанотехнологии, то было бы полезно понять, как они изменят нашу жизнь, чтобы мы могли составить более разумные планы для наших семей, карьеры, компаний и общества. Но многие умные люди ответят, что понять будущее невозможно, что оно слишком непредсказуемо. Это зависит, конечно, от того, что вы пытаетесь предсказать:

— Погода через месяц? Забудьте об этом, погода слишком изменчива.

— Положение Луны через столетие? Легко. Орбита Луны работает, как часовой механизм.

— Какая конкретно компьютерная компания станет ведущей через двадцать лет? Удачи. Современные крупные компании двадцать лет назад еще даже не существовали.

— Станут ли персональные компьютеры намного мощнее? При определенных обстоятельствах.

И так далее. Если вы хотите сказать что-то разумное о будущем влиянии технологии, примените хитрость: нужно задать правильные вопросы и избежать стандартных ловушек. В своей книге «Мегазаблуждения: прогнозирование и миф о быстрых технологических изменениях», Стивен П. Шнаарс исследовал многие заблуждения и их воздействие на возможные прогнозы. Заимствуя и адаптируя некоторые из его обобщений, можно предложить, какие ошибки нужно сделать, чтобы прийти к мегаошибке в прогнозировании:

— Игнорируйте научные факты и предположения.

— Не интересуйтесь тем, понадобится ли кому-нибудь прогнозируемый продукт, захочет ли кто-нибудь попасть в прогнозируемую ситуацию.

— Игнорируйте предстоящие расходы.

— Попробуйте предсказать, какая компания или технология выиграет.

Оценивая то, что можно ожидать от нанотехнологий — или любой технологии — подобного подхода следует избегать, поскольку это может привести к настоящему абсурду. Совершая классическую первую ошибку, кто-то однажды придумал идею о том, что таблетки когда-нибудь заменят пищу. Но людям нужна энергия, чтобы жить, а энергия — это калории, то есть топливо, которого должно быть достаточно. Чтобы прокормиться одними таблетками, их нужно глотать горстями. Это было бы похоже на поедание безвкусного корма для собак, что вряд ли здоровая

идея. Короче говоря, предсказание таблеток для еды игнорирует научные факты. В том же духе мы когда-то слышали обещания вылечить рак — они были основаны всего лишь на предположении, основанном на научных фактах. Считалось, что рак — это одна болезнь, которая имеет одну точку уязвимости и, следовательно, должно существовать одно лекарство. Это предположение было неверным, и прогресс в борьбе с раком был медленным.

Ранее мы представили сценарий, который включает в себя рутинное лечение рака с использованием нанотехнологий. Этот сценарий учитывает известные в настоящее время факты: раковые заболевания различаются, но каждый вид может быть распознан по его молекулярным особенностям. Молекулярные машины могут распознавать молекулярные особенности и поэтому должны быть подготовлены для обнаружения и уничтожения раковых клеток определенных видов по мере их появления. Мы рассмотрим медицинские применения нанотехнологий в главе 10.

Даже нанотехнологии не могут втиснуть еду в таблетку, и это хорошо. Предложение о таблетках для еды не просто противоречит фактам, оно также игнорирует желания людей — такие привычные вещи, как хороший ужин или новые этнические кухни. Журналы когда-то обещали города под морем, но кто хочет жить в самом сыром и холодном климате? Калифорния и солнечные курорты, естественно, оказались более популярными. А еще нам обещали говорящие автомобили, но после того, как они появились, выяснилось, что люди предпочитают роскошные автомобили, соблюдающие тишину.

Многие человеческие потребности легко предсказать, потому что они давно известны и не меняются со временем: люди хотят лучшего медицинского обслуживания, жилья, потребительских товаров, транспорта, образования, и предпочитают, чтобы доставалось все это дешево, а жизнь была безопасной и протекала в чистой окружающей среде. Когда наши ограниченные возможности заставляют нас выбирать между лучшим качеством жизни и низкой стоимостью или между большей безопасностью и чистой окружающей средой, решения становятся неочевидными. Молекулярное производство позволит сделать большой шаг в направлении повышения качества и снижения затрат, а также повышения безопасности и чистоты окружающей среды. (Выбор того, чего будет больше, а чего меньше, остается.) Нет рыночного спроса на нанотехнологии как таковые, но есть большой спрос на то, что они могут сделать.

Пренебрежение затратами также было популярно среди прогнозистов: строительство городов под морем было бы очень

дорогим, но выгоды принесло мало. Строительство в космосе имеет больше преимуществ, но было бы еще более дорогим, если использовать прошлые или нынешние технологии. Многие смелые прогнозы пылятся на полках, потому что затраты на их разработку и производство слишком высоки. Примеры — личные роботы, летающие автомобили и лунные колонии — они все еще больше напоминают научную фантастику 1950-х годов, чем практические возможности. И стоимость является одной из основных причин, почему это так.

Молекулярное производство, в частности, связано с сокращением затрат. Как уже упоминалось выше, природные молекулярные машины — деревья, картофель и сено — не требуют лишних затрат. Деревья более сложны, чем космические корабли, но почему космические корабли должны оставаться более дорогими? Гордон Таллок, профессор экономики и политологии в Университете Аризоны, так говорит о молекулярной нанотехнологии: «ее экономический эффект заключается в том, что мы все будем намного богаче». Перспектива создания сложных продуктов по цене картофеля дает повод вернуться к рассмотрению многих старых проектов. Мы надеемся, что вы не возражаете против облака пыли, которое поднимается, когда мы достанем их с полок, чтобы подойти к их решению с новыми возможностями.

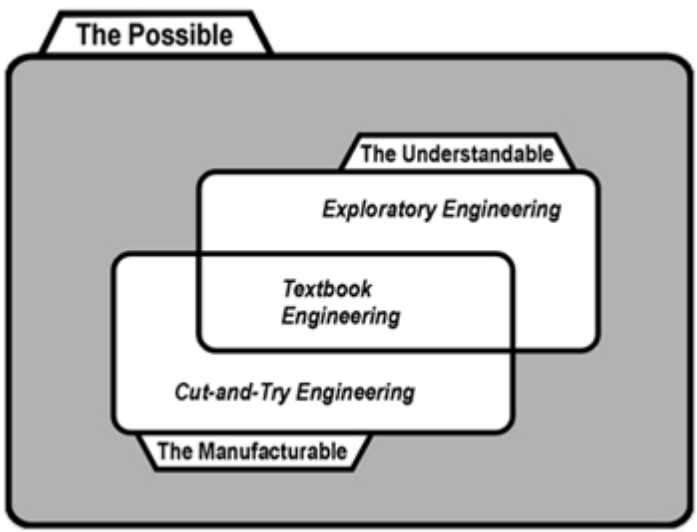
Даже оставаясь в рамках известных науке фактов, сосредоточившись на вещах, которые люди хотят получить, и обращая внимание на затраты, все еще трудно выбрать конкретного победителя. Развитие технологий похоже на скачки: все знают, что какая-то лошадь должна выиграть, а еще, что какая-то лошадь сильнее (и стоит больших денег). И корпоративные менеджеры, играющие на деньги, и исследователи, ставящие на кон свою карьеру, вынуждены играть в эту игру, не удивительно, что они часто проигрывают. Технология может работать, предоставлять что-то полезное и быть менее дорогой, чем альтернативная прошлая, но все же проиграть на рынке чему-то неожиданному, сделанному лучше. Чтобы знать, какие технологии победят, вы должны знать все альтернативы, независимо от того, изобретены ли они уже или нет. Удачи вам!

Мы не будем пытаться играть в эту игру. Нанотехнология (как и современная промышленность) состоит из множества различных технологий. Однако, нанотехнология в той или иной форме является совершенно очевидной идеей: она станет кульминацией векового стремления к более тщательному контролю над структурами вещества. Предсказать, что какая-то

форма нанотехнологии выиграет большинство технологических гонок, это все равно, что утверждать, будто какая-то лошадь выиграет все скачки (в отличие, скажем, от таксы). Технология, основанная на тщательном контроле над структурой вещества, почти всегда будет превосходить технологию, основанную на грубом контроле. Некоторые технологии уже выиграли гонки, в буквальном смысле стали первыми. Однако мало кто побеждает только потому, что он лучший.

Исследовательские технологии

Исследования в области нанотехнологий сегодня находятся в стадии проектирования и только начинают переходить к инженерным решениям. Основная идея исследовательской инженерии проста: объединить инженерные принципы с известными научными фактами, чтобы сформировать картину будущих технологических решений. Исследовательская инженерия рассматривает будущие возможности, чтобы определиться с тем, что делать сейчас. Наука — особенно молекулярная — быстро развивалась в последние десятилетия. Нет необходимости ждать новых научных прорывов для того, чтобы осуществить инженерные прорывы в нанотехнологиях.



Исследовательская инженерная диаграмма венна

Внешний помеченный прямоугольник представляет собой набор всех технологий, разрешенных законами природы, независимо от того, существуют ли они уже или пока это еще только проекты. То есть современные технологии и те, работа которых может быть объяснена с позиций сегодняшней науки. Учебники учат тому, что понятно (следовательно, чему можно обучить) и технологично (что может быть использовано). Инженеры-практики достигают успехов, тестируя методы и используя их в производстве. Инженеры-исследователи изучают то, что можно будет использовать в будущем, поскольку производственные возможности расширяются.

На приведенной выше иллюстрации показано, как исследовательская инженерия соотносится с более привычными видами техники. Обе работают в пределах своих возможностей, заданных известными и пока неизвестными законами природы. Наиболее понятной является инженерия, преподаваемая в школах: «учебник инженерии» включает технологии, которые могут быть, как поняты (их можно изучать), так и изготовлены (их можно использовать). Мостостроение и конструкция редуктора относятся к этой категории. Существуют технологии, которые могут быть изготовлены, но пока не поняты — любой инженер может привести примеры технологий, которые работают и перестают работать без очевидной причины. Но пока они исполняют свою функцию без сбоев, их можно спокойно использовать. Это мир инженерии проб и ошибок, столь важный для современной промышленности. Смазка подшипника, клеи, и многие другие производственные технологии есть примеры такого подхода.

Исследовательская инженерия занимается технологиями, которые могут быть поняты, но еще не изготовлены. Технологии из этой категории знакомы инженерам, хотя обычно они проектируют такие вещи только для удовольствия. О механике, термодинамике, электронике известно так много, что инженеры часто могут рассчитать любой процесс просто из описания. Тем не менее, нет никаких причин утверждать, будто все, что может быть правильно описано, должно стать технологией — есть ограничения. Исследовательская инженерия так же проста, как написание учебников, но ни военные стратеги, ни руководители корпораций не видят в ней источник большой прибыли, поэтому она не получила еще заслуженного признания.

Концепции молекулярного производства и молекулярной нанотехнологии являются прямыми результатами поисково-технических исследований. Как мы уже отмечали выше, ее основные идеи могли быть разработаны еще сорок лет назад, если бы кто-нибудь этим занялся. Однако, и ученых, и инженеров интересовали более насущные проблемы. Но теперь, с появлением нанотехнологий, внимание начинает фокусироваться на перспективах их использования.

Нанотехнологии, похоже, определяют направление развития нашей цивилизации, если эти технологии продолжат развиваться, возникшая конкуренция практически гарантирует, что прогресс не остановится. Это приведет к появлению множества возможностей не только для получения выгоды, но и для злоупотреблений. Далее мы будем рассматривать различные сценарии, чтобы составить представление о перспективах и

возможностях нашего развития, но мы не делаем прогнозов того, что произойдет на самом деле. Реальные человеческие выборы и ошибки будут зависеть от целого ряда факторов и альтернатив, выходящих за рамки того, что мы способны предвидеть.

Глава 2
Молекулярный мир

Нанотехнология позволит создавать разнообразные предметы различного размера, начиная от молекулярного масштаба, постепенно переходя к крупным изделиям. Новые технологии приведут к революционному изменению человеческих возможностей, как это ранее сделало развитие сельского хозяйства или появление техники. Нанотехнологии можно будет использовать даже для того, чтобы отменить многие из преобразований, привнесенных земледелием или использованием техники. Но мы, люди, существа большого размера, мы не обладаем способностью наблюдать молекулярный мир непосредственно, и это может сделать нанотехнологию трудной для визуального представления и, следовательно, трудной для понимания. Ученые, работающие с молекулами, сталкиваются с этой проблемой уже сегодня. Часто они могут вычислить, как поведут себя молекулы, но чтобы понять, почему так происходит, им необходимо что-то большее, чем простой набор цифр: им нужны фотографии, фильмы и интерактивные симуляции, и поэтому они все чаще занимаются ими. Национальный научный фонд США запустил программу «научная визуализация», в частности для того, чтобы использовать суперкомпьютеры для решения проблемы наглядного изображения молекулярного мира.

Молекулы — это объекты, которые оказывают воздействие друг на друга. Если бы ваши руки были достаточно малы, вы могли бы схватить их, сжать и ударить друг о друга. Попытка понять молекулярный мир очень похожа на изучение любого другого физического мира: это вопрос выяснения размера, формы, энергии, направления движения и тому подобного, помогающего ответить на вопрос, чем отличаются песок, вода, камни, сталь и мыльные пузыри. Современные инструменты визуализации уже сейчас дают представление о том, что станет возможным при использовании завтрашних более быстрых компьютеров и совершенных «виртуальных реальностей». Они смогут моделировать миры, которые позволят вам путешествовать там, несмотря на то, что они «существуют» только как компьютерная модель. Прежде чем обсуждать нанотехнологии и то, как они соотносятся с современными технологиями, давайте попробуем получить более конкретное представление о молекулярном мире, использовав симуляцию

одного сценария. Надо отметить, что события и технологии, датируемые 1990 годом или более ранним, являются исторически точными; более поздние даты — это либо прогнозы, либо просто элементы сценария. В модели добавлены только те художественные описания, которые полностью соответствуют проектам и расчетам, основанным на стандартных научных данных, так что научные идеи в ней не являются вымыслом.

Исследование молекулярного мира

В сценарии, описанном в предыдущей главе, мы видели, как Джоэл Грегори манипулирует молекулами в виртуальной реальности моделируемого мира, используя видеоочки, тактильные перчатки и суперкомпьютер. В начале двадцать первого века все это можно будет проделывать еще лучше. Представьте себе, что сегодня вечером вы заснете и проснетесь десятилетия спустя в нанотехнологическом мире.

В двадцать первом веке даже больше, чем в двадцатом, легко будет заставить какие-то вещи работать, мало понимая, как они устроены. Для любого новичка большая часть технологий кажется магией, что, конечно, не так. Рано или поздно вы на личном опыте захотите понять, что такое нанотехнологии. В конце двадцатого века большинство учителей использовали для объяснений слова и простые картинки, но теперь — для лучшего понимания — проще использовать компьютерную модель. И вот вы решили воспользоваться имитацией молекулярного мира.

Просматривая сопроводительную брошюру, вы узнаете множество утомительных фактов о моделировании: насколько точно оно описывает размеры, силы, движения и т. п.; насколько оно похоже на рабочие инструменты, используемые как студентами-инженерами, так и профессионалами; как вы можете приобрести его для личного использования и т. д. В ней объясняется, как можно путешествовать по человеческому телу, увидеть современные нанотехнологии в действии, начиная с бактерии и т. д. Для начала вы захотите совершить ознакомительный тур: воспользовавшись реальными моделями объектов, созданными в двадцатом веке, и причудливыми концепциями нанотехнологий, которые тогда высказывались.

Заплатив небольшие деньги и запомнив несколько ключевых фраз (годится любой вариант приказа «вытащи меня отсюда»), вы надеваете силовой костюм, кладете в карман говорящего гида, входите в имитационную камеру и надеваете на глаза видеоочки. Глядя через эти очки, у вас создается впечатление, что вы находитесь в комнате со столом, которого, как вы знаете, на самом деле нет, и стенами, которые кажутся расположенными слишком далеко, чтобы поместиться в комнате, где вы знакомитесь с имитацией. Но уловка с беговой дорожкой, заставляет думать, что вам приходится долго идти к стене, а потом вы возвращаетесь и ударяете кулаком по столу, ощущая при этом, что он твердый, потому что силовой костюм резко останавливает вашу руку в нужном месте. Вы даже можете

почувствовать текстуру древесины ножки стола, потому что перчатки силового костюма прижимаются к вашим пальцам нужным образом. Моделирование не идеально, но на мелкие дефекты можно не обращать внимания. На столе лежит (или кажется, что он там лежит) старый кремниевый компьютерный чип 1990-х годов. Когда вы поднимаете его, как показывает инструкция для начинающих, он выглядит как на рисунке 1A. Тогда вы говорите: «уменьшите меня», и, кажется, что мир расширяется.

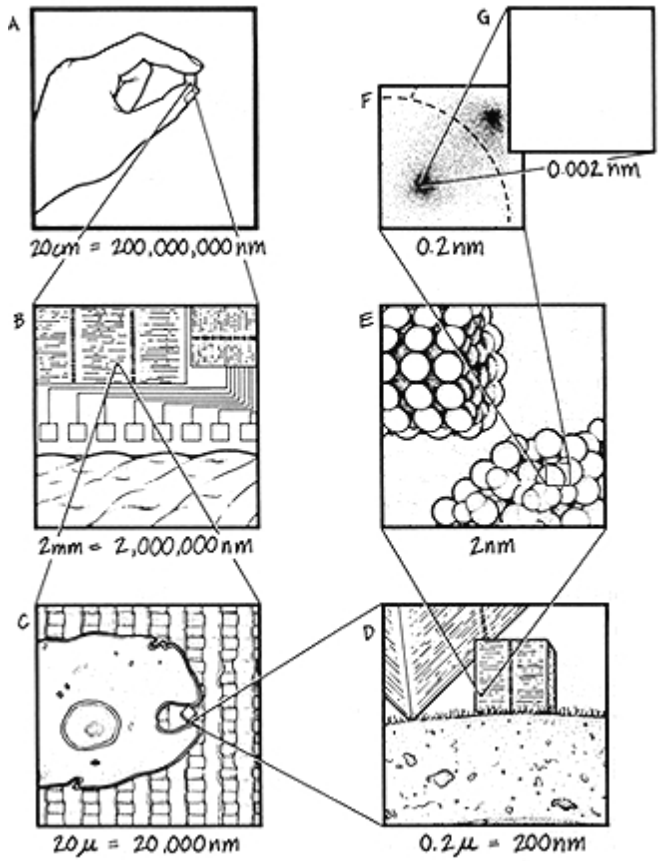


Рисунок 1. СИЛА ДЕСЯТИ

На картинке (1A) изображена рука, держащая компьютерный чип. На следующей (картинка 1B) это действие показано увеличенным в 100 раз. Еще одно увеличение в 100 раз (картинка 1C) показывает живую клетку, помещенную на чипе, чтобы был понятен масштаб. Увеличиваем еще в 100 раз (картинка 1D) и обнаруживаем два нанокомпьютера рядом с ячейкой чипа.

Меньший (показанный как блок) имеет примерно ту же мощность, что и чип, изображенный на первой картинке; больший (у которого виден только угол) является таким же мощным, как высокоскоростной сервер середины 1980-х годов. Увеличение еще в 100 раз (картинка 1E) показывает отдельный белок из клетки в правом нижнем углу и цилиндрическую шестерню, изготовленную молекулярным ассемблером в левом верхнем углу. На следующей картинке (1F), увеличенной еще в 10 раз, видны два атома белка, причем электронные облака изображены штриховкой. Последнее увеличение в 100 раз (картинка 1G) показывает ядра атомов как крошечные пятнышки.

Зрение и движение

Вам покажется, что вы как будто быстро падаете на поверхность чипа, сокращаясь в размерах. Через мгновение все будет выглядеть примерно как на рисунке 1B с большим пальцем, все еще держащим его. Теперь все становится расплывчатым, а затем вы приближаетесь к молекулярному уровню и попадаете в непривычный мир. Оказывается, ваше зрение перестает работать — есть свет, но он воспринимается как нечеткий туман. Сначала вашу кожу щекочут небольшие удары, а затем удары становятся сильнее, кажется, что в вас попадают твердые мраморные шарики из детской игры. Ваши руки и ноги перестают слушаться, будто бы попали в турбулентность, они болтаются в разные стороны, все сильнее и сильнее. Земля ударяет вас по ногам, вы спотыкаетесь и прилипаете к земле, как муха на липучке.

Сильные удары продолжаются, вам становится больно. Вы просили реальных ощущений, и только встроенные в скафандр системы безопасности удерживают симулированные тепловые колебания молекул воздуха и ваших собственных рук от избиения вас до бесчувствия.

Команда «Стой!» дает вам возможность отдохнуть от дергания костюма и болезненных ударов. Команда «Стандартные настройки» делает мир вокруг вас более разумным. Моделирование меняется. Искусственные глаза теперь меньше, чем световая волна, что делает невозможным фокусирование, но очки возвращают вам четкое зрение и показывают атомы вокруг в виде маленьких сфер. (Настоящие наномашины так же слепы, как и вы, минуту назад, но не могут ошибаться). Вы находитесь на поверхности компьютерного чипа 1990-х годов, между ячейкой и двумя блочными нанокомпьютерами, такими, как на рисунке 1D. Ваше смоделированное тело имеет высоту 50 нанометров, около 1/40, 000, 000 вашего реального размера, а меньший нанокомпьютер в два раза выше вас. При таком размере вы можете «видеть» атомы и молекулы, как на рисунке 1E.

Симуляция продолжает обстреливать вас молекулами воздуха, но стандартные настройки оставляют ощущение того, что вас забрасывают мраморными шариками. Мгновение назад вы были плотно прижаты к Земле молекулярной липкостью, но стандартные настройки делают ваши мышцы стальными, — по крайней мере, в симуляции — а все остальное вокруг намного мягче и слабее. Гид сообщает, что единственные нереальные особенности симуляции связаны с вашим там присутствием — и это не только способность видеть и игнорировать тепловые

колебания и бомбардировку, но само ваше существование в размере, слишком малом для чего-либо столь сложного, как человек. Это также объясняет, почему вы можете видеть, как объекты движутся. Поскольку каждый раз, уменьшая размер в 10 раз, симулятор также в 10 раз замедляет все происходящее. Кроме того, он делает вас сильнее и, следовательно, быстрее. Итак, с вашей увеличенной силой и некоторыми приспособлениями, делающими ваши руки, ноги и туловище менее липкими, вы можете стоять, видеть, чувствовать и оценивать ситуацию.

Молекулярная текстура

Земля под ногами, как и все вокруг, покрыта камешками размером с атом и наростами размером с кончики ваших пальцев. Объекты выглядят как гроздья прозрачного винограда или соединенные мраморные шарики, раскрашенные разнообразными красивыми, но воображаемыми цветами. Моделирование показывает, что атомы и молекулы очень похожи на те изображения, которые использовались химиками в 1980-х годах, но с более четким трехмерным изображением, возможностью их перемещать и ощущать прикосновения к ним. На самом деле, система моделирования — это не что иное, как улучшенная версия систем, созданных в конце 1980-х годов. Компьютеры стали работать быстрее, но они рассчитывают те же самые вещи. Видеоочки стали лучше, и появление силовых костюмов — это серьезное достижение, но даже в 1980-х годах были трехмерные изображения молекул на дисплеях и грубые устройства, которые давали ощущение прикосновения к ним.

Перчатки и силовой костюм создают ощущение прикосновения к тому, что имитирует компьютер. Когда вы проводите пальцем по стенке маленького нанокомпьютера, возникает необычная реакция, ее трудно описать. Как будто его поверхность намагничена — если вы пытаетесь прикоснуться, она давит на кончик пальца. Но результат не резкий контакт, потому что поверхность не твердая, как должно быть у магнита, а странно мягкая. Ощущение от поверхности подобно прикосновению к туману, который плавно превращается в поролон, затем в твердую резину, затем в сталь, и все это в пределах толщины листа гофрированного картона. Двигаясь по стенке, кончик пальца не ощущает ни текстуры, ни трения, только гладкие выпуклости, более скользкие, чем масло, в конце концов, его затягивает в пустоту. Чтобы вытащить палец на поверхность требуется некоторое усилие. Моделирование заставляет ваши пальцы размером с атом чувствовать те же силы, что и настоящие атомы. Странно, насколько поверхность скользкая — а она не могла быть смазана, так как даже одна молекула масла была бы шишкой размером с ваш большой палец. Эта способность к скольжению подсказывает, как могут работать наноразмерные подшипники, как будут плавно скользить друг относительно друга детали молекулярных машин.

Но вдобавок, ощущается еще покалывание в пальцах, словно прикасаешься к работающему громкоговорителю. Приложив ухо к стенке нанокомпьютера, вы вздрагиваете: на мгновение вы

слышите звук, похожий на шипение телевизора двадцатого века, настроенного на канал без трансляции, без снега и статики — но звук громкий, болезненно громкий. Все атомы на поверхности вибрируют на высоких частотах, слишком быстро, чтобы это увидеть. Это тепловые колебания, и понятно, почему их еще называют тепловым шумом.

Газ и жидкость

Отдельные молекулы все еще колеблются слишком быстро, чтобы это можно было увидеть. Итак, пришло время сделать еще одну поправку в симуляции. Вы подаете команду «Вау» и все вокруг замедляется в десять раз.

Теперь вы можете видеть на поверхности тепловые колебания, которые до этого были слишком быстрыми. Кроме того, становятся легче наблюдать молекулы воздуха. Они шумят так же громко, как капли дождя в бурю, на этот раз они размером с мраморные шарики и разлетаются во всех направлениях. Они также способны прилипать как намагниченные, и некоторые из них скользят по стенке нанокомпьютера. Когда вы пытаетесь схватить какую-нибудь молекулу, она ускользает. Большинство из них похожи на две сросшиеся сферы, но вы замечаете одну, которая совершенно круглая — это атом аргона, они встречаются довольно редко. Крепко обхватив ее со всех сторон, чтобы она не выскользнула, как арбузное семя, вы стискиваете ее своими сильными стальными пальцами. Атом сжимается примерно на 10 процентов, после чего сопротивление становится больше, и вы не можете его преодолеть. Он возвращается в первоначальное состояние мгновенно и идеально, как только вы расслабляетесь, а затем выскальзывает из вашего захвата. Атомы, окружающие вас густыми роями, обладают непривычным совершенством, они упруги и неизменны.

У основания стены находится что-то вспенивающееся, это может быть только каплей воды. Зачерпнув пригоршню для более подробного рассмотрения, мы получаем рой молекул, их сотни, они неуклюже кувыркаются, но стремятся сцепиться в единую массу. Но вот одна из них вырывается и улетает в свободный хаос окружающего воздуха: так испаряется вода. Некоторые молекулы скользят вверх по руке и собираются подмышкой, но и они в конечном итоге уносятся прочь. Чтобы избавиться от всех молекул воды, требуется слишком много усилий, поэтому, чтобы обсохнуть, вы отдаете приказ: «очистить меня».

Слишком маленький и слишком большой

Рядом с вами маленький нанокомпьютер — это блок в два раза выше вашего роста, но на него легко взобраться, как это предлагает сделать гид. Гравитация менее важна в малом масштабе: даже муха может бросить вызов гравитации, чтобы ползать по потолку, и муравей может поднять то, что в нашем мире было бы сравнимо с грузовиком. При моделируемом размере в пятьдесят нанометров гравитация ничего не значит. Материалы сохраняют свою прочность, и их так же трудно согнуть или сломать, но вес объекта становится незначительным. Даже без усиления прочности, которое позволяет преодолеть молекулярную липкость, вы можете поднять объект в 40 миллионов раз больше вашей массы. Так в нашем мире человек нормального размера поднял бы коробку с полдюжиной полностью загруженных нефтяных танкеров. Чтобы имитировать столь слабую гравитацию, силовой костюм уменьшает вес вашего тела, заставляя вас чувствовать себя так, словно вы плывете. Это почти как отпуск в орбитальном тематическом парке, прогулки с липучками по стенам и потолкам. И еще много чего, но без необходимости в антирвотных препаратах.

Выше нанокомпьютера на рис. 1E находится отдельная молекула белка. Она похожа на гроздь винограда, и примерно такого же размера. Она даже ощущается как гроздь винограда — мягкая и рыхлая. Ее части не летают свободно как газ, не падают и не растекаются как жидкости, но они дрожат как желатин, а иногда рассыпаются или скручиваются. Сама молекула белка достаточно прочна, но их структура недостаточно устойчива, чтобы выдержать ваши стальные пальцы. В 1990-х годах люди начали строить молекулярные машины из белков, копируя биологические образцы. Это сработало, но легко понять, почему они перешли к лучшим материалам.

Из имитированного кармана вы достаете имитированное увеличительное стекло и рассматриваете имитированный белок. При увеличении в 10 раз вам удается увидеть пару связанных атомов на поверхности, как изображено на рисунке 1F. Атомы почти прозрачны, но даже пристальный взгляд не позволяет разглядеть их ядро, потому что оно слишком мало. Чтобы увидеть его потребовалось бы увеличение в 1000 раз, даже если бы вы с самого начала видели атомы невооруженным глазом. Как люди могли спутать большие, пухлые атомы с крошечными пятнышками, похожими на ядра? Вспомним, что ваши сильные стальные пальцы не смогли сжать атома аргон так, чтобы

приблизиться к его ядру, становится понятно, почему ядерный синтез так сложен. Гид пояснил, что для того, чтобы пробить атомное ядро и позволить двум ядрам слиться, потребуется реальный снаряд, который бы двигался в сто раз быстрее, чем мощная винтовочная пуля. Как бы вы ни старались, в молекулярном мире нет ничего, что могло бы проникнуть в середину атома и пробиться в его ядро. Вы не можете прикоснуться к нему, и вы не можете его увидеть, поэтому перестаньте вглядываться через увеличительное стекло. Ядра атомов большого интереса для нанотехнологий не представляют.

Загадочные цепочки

Следуя совету гида, вы беретесь за две молекулярных шишки белка и тянете. Какое-то мгновение белок сопротивляется, но затем петля освобождается, позволяя другим петлям разрушаться, и вся структура, кажется, разваливается извивающимися кольцами. Совершив небольшие действия и преодолев сопротивление, можно рассмотреть структуру белка: это длинная цепь, если бы вам удалось ее распрямить, она оказалась бы длиннее вас. Каждый сегмент ее цепи имеет одну или несколько торчащих шишек. Если стеклянно-бисерное изображение атомов сделать разноцветным, то белковая цепь будет напоминать яркое ожерелье. Это может быть декоративно красиво, но как все это соединяется? Когда вы тянете, толкаете и крутите, цепь разваливается, крутится и дергается, первоначальная плотная и прочная структура не сохраняется. Возможностей ошибиться в сворачивании цепочки больше, чем в решении кубика Рубика, и теперь, когда сложенная структура исчезла, даже не ясно, как должен выглядеть «правильный» результат. Как исследователи двадцатого века решали пресловутую «проблему свертывания белка»? Дело в том, что они начали строить белковые объекты еще в конце 1980-х годов.

Молекула белка не может восстановить структуру сама по себе, поэтому вы пытаетесь ее сложить. Крепкий захват и мощный рывок немного выпрямляет секцию, но цепь держится вместе и защелкивается снова. Хотя разворачивать ее было легко, но даже стальные мышцы с силой Супермена не могут разорвать эту цепь. Химические связи удивительно крепки, так что пришло время обмануть реальность снова. И вы говорите: «слабый мир на одну секунду». Теперь ваши руки легко разрывают цепь надвое, прежде чем ее сила связи вернется к норме. Вы совершили химическое изменение, но должны быть способы проще, поскольку химики делают свою работу без крошечных сверхсильных рук и меняющих физику приказов. Пока вы пытаетесь соединить оборванные концы разорванной цепочки, они болтаются и ударяются друг о друга. Когда это происходит в третий раз, цепь снова соединяется, такая же сильная, как и раньше. Это похоже на защелкивающиеся детали, но защелки намного прочнее, чем сварная сталь. Современная химия ассемблеров обычно использует другие подходы, но представление о том, как это происходит в реальности, делает идею молекулярной сборки более понятной: поместите необходимые части вместе в правильные позиции, и они соединятся самостоятельно, образуя

большую структуру.

Вспомнив о команде «Вау», вы решили вернуться к правильно масштабированной скорости для вашего размера и силы. Сказав «Стандартные настройки!», вы увидите, как скорость распада цепочки белков возрастает, снова превратившись в трудноразличимые размытые объекты.

Наномашины

У ваших ног находится ребристый, окруженный кольцами цилиндрический объект размером с суповую банку — не беспорядочная, свободно свернутая нить, как белок (до того, как он развалился), а твердый объект современной нанотехнологии. Например, такой, как изображен на рис. 1E. Выбирая его, вы можете сразу же почувствовать, насколько он отличается от белка. В шестеренке все удерживается на месте такими же прочными связями, как те, что нанизывают друг на друга бусинки белковой цепи. Он не может развернуться, и вам придется снова отдавать приказ, чтобы нарушить его идеальную симметрию. Как и в стенке нанокомпьютера, его прочно прикрепленные атомы слегка вибрируют. Рядом есть еще одна шестерня, поэтому вы соединяете выпуклости первой с впадинами второй. Они слипаются, и мягкие, гладкие атомные поверхности позволяют им плавно катиться.

Переходим к нанокомпьютеру, огромному механизму, построенному описанным выше способом. Сквозь его прозрачную стенку можно наблюдать за внутренними работами. Вот вращается электрический двигатель шириной в руку, поворачивая кривошип, который приводит в движение набор колеблющихся стержней, которые, в свою очередь, приводят в движение стержни меньшего размера. Это не похоже на компьютер; это больше похоже на фантазию инженера из девятнадцатого века. Все дело в его древней конструкции — гид сообщил, что первоначальный замысел был частью исследовательского проекта, относящегося к середине 1980-х годов. Механическая конструкция, была позже заменена новейшими электронными разработками, прежде чем у кого-либо нашлись возможности для создания хотя бы прототипа. Эта симуляция основана на версии, созданной любителем много лет спустя.

Механический нанокомпьютер может быть грубым, но он работает, и он намного меньше и эффективнее, чем электронные компьютеры начала 1990-х годов. Стержни скользят взад и вперед, блокируя и разблокируя друг друга, сплетаясь в меняющихся узорах логики. Этот нанокомпьютер — урезанная модель, почти без памяти, бесполезная сама по себе. На рисунке 1D вы видите другой блок — тот, что слева — на котором изображена машина, достаточно мощная, чтобы конкурировать с большинством компьютеров, построенных в 1990 году. Размер этого компьютера одна миллионная метра, но с того места, где вы стоите, он выглядит как блочное десятиэтажное здание. Гид

сообщает, что он содержит более 100 миллиардов атомов и хранит столько же данных, сколько комната, полная книг. Вы можете увидеть и систему хранения информации: ряд за рядом стеллажей, содержащих катушки молекулярной ленты, немного похожие на белковую цепь, но с выпуклостями и впадинами, представляющими 1 и 0 компьютерных данных.

Эти нанокомпьютеры кажутся большими и грубыми, но напомню, что вы сейчас стоите на чипе 1990 года, который является частью компьютера, примерно такого же мощного, как и меньший, урезанный нанокомпьютер рядом с вами. Когда вы смотрите на чип, то лучше понимаете, насколько грубыми были вещи несколько десятилетий назад. У ваших ног, в самом маленьком масштабе, чип выглядит очень непрезентабельно. Хотя стенка нанокомпьютера тоже покрыта шишками атомов, но они располагаются последовательно как плитка. А вот поверхность чипа представляет собой беспорядочное нагромождение кусков и неровностей, которые распространяются на десятки шагов во всех направлениях, и заканчиваясь плохо очерченным утесом, отмечающим край одного из транзисторов. За ними вы можете увидеть другие хребты и плато, простирающиеся до горизонта. Они образуют грандиозные, регулярные схемы, схемы компьютера. Горизонт — край чипа — настолько далек, что прогулка туда от центра (как предупреждает гид) займет несколько дней. И эти огромные куски ландшафта считались чудесами миниатюризации двадцатого века?

Клетки и тела

Уже тогда исследования в области молекулярной биологии показали существование меньших, но более совершенных машин, таких как молекулы белка в клетках. Рассмотрим смоделированную человеческую клетку на чипе рядом с меньшим нанокомпьютером. Ее поместили туда, чтобы посетители могли сравнить их размеры. Гид указывает, что симуляция немного обманывает, заставляя клетку действовать так, как будто она находится в водной среде, а не в воздухе. Клетка превосходит по размерам нанокомпьютер, растянувшись по поверхности чипа и поднимаясь в небо, как маленькая гора. Прогулка по природной тропе вокруг ее края проходит через многие транзисторные плато и займет около часа. Одного взгляда достаточно, чтобы показать, насколько клетка отличается от нанокомпьютера или шестеренки: она выглядит органическим объектом, выпячивается и изгибается как капля печени, но ее поверхность лохматая с волнистыми молекулярными цепями.

Подойдя к ее краю, вы можете увидеть, что мембрана, окружающая клетку, жидкая (в то время, как клеточные стенки жесткие, как, например, у растений), и ее молекулы находятся в постоянном движении. Если вы, повинуясь импульсу, просунете руку сквозь мембрану и заглянете внутрь, то можете почувствовать, как отдельные белки сталкиваются и перемещаются во внутренней жидкости клетки, а также нарушают белковую структуру. Где-то внутри находятся молекулярные машины, которые создали все эти белки, но они встроены в бурлящую органическую массу. Когда вы вытаскиваете руку, мембрана моментально закрывается. Жидкая, динамическая структура клетки в значительной степени способна к самовосстановлению. Вот что позволяло ученым проводить эксперименты на клетках старыми, грубыми инструментами двадцатого века: им не нужно было зашивать отверстия, которые они делали, когда копались внутри клеток.

Даже одна человеческая клетка огромна и сложна. Ни одно реальное мыслящее существо не может быть таким маленьким, как вы в симуляции: обычный компьютер без памяти в два раза выше вас, а более крупный нанокомпьютер, размером с жилой комплекс, не умнее одного из слабосильных компьютеров 1990 года. Даже сгибаемый палец не может быть таким маленьким, как ваши смоделированные пальцы: в симуляции они имеют ширину всего в один атом, не оставляя места для самого тонкого возможного сухожилия, не говоря уже о нервах.

В последний раз взглянув на органический мир, вы смотрите за горизонт и видите изображение своего собственного большого пальца, держащего чип, на котором вы стоите. Выпуклость вашего большого пальца поднимается в десять раз выше Эвереста. Наверху, заполняя небо, маячит лицо, похожее на Землю, видимую с орбиты, которое смотрит вниз. Это ваше собственное лицо, со щеками размером с континент. Глаза неподвижны. Вспоминая данные, которые сообщил гид, вы знаете: моделирование использует стандартные правила механического масштабирования, поэтому, будучи в 40 миллионов раз меньше, вы стали в 40 миллионов раз быстрее. Чтобы освободить вас от реальных размеров, он сделал вас сильнее более чем в 100 раз, что увеличивает вашу скорость более чем в 10 раз. Таким образом, одна секунда в обычном мире соответствует более чем 400 миллионам здесь, в симуляции. Потребовались бы годы, чтобы увидеть, как это огромное лицо в небе моргнет.

Достаточно впечатлений. По команде «вытащите меня» молекулярный мир исчезает, а ваше чувство веса возвращается, когда силовой костюм ослабевает. Вы снимаете видеоочки и очень медленно моргаете.

Глава 3
Технологии снизу вверх

Путешествие в микромир, которое мы совершили в предыдущей главе, показало размеры, действующие там силы и общую природу объектов в молекулярном мире. Основываясь на этом, мы можем лучше представить, куда, по-видимому, ведут наши разработки, составить более четкую картину самого молекулярного производства. Чтобы расширить наше представление о размерах, действующих силах и общей природе объектов в молекулярном производстве, мы приглашаем читателя (и его любознательное альтер эго) совершить второй и последний тур, прежде чем вернуться в мир современных исследований. Как и прежде, история до 1990 года точна, и научные факты не является вымыслом.

Музей Силиконовой долины

Путешествие по молекулярному миру познакомило нас с некоторыми продуктами молекулярного производства, но не показало, как они были сделаны. Вы все еще помните старые технологии, которые в основном были заменены — но как это произошло? Музей Силиконовой долины рекламируют как «подлинный тематический парк, сохранивший память о жизни, работе и играх первых лет после прорыва». Поскольку «работа» должна включать в себя производство, кажется, нам стоит его посетить. Широкий купол венчает парк — «чтобы представить наилучшим образом подлинные достопримечательности, звуки и запахи той эпохи», вежливо говорит гид. Внутри одежда и прически, газетные заголовки, автомобильное движение, все выглядит так же, как и до вашего долгого сна. Легкая дымка скрывает здания на дальней стороне купола, ваши глаза загораются в предвкушении, и воздух пахнет по-настоящему аутентично.

Карманные библиотеки

Корпорация «Нанофаб» специализировалась на изготовлении дисплеев, разработанных на основе предыдущей нанотехнологии. И вот вы подходите к зданию, и гид сообщает, что перед вами действительно реальный завод-изготовитель, считавшийся передовым производством более двадцати лет назад, а затем, десять лет спустя, ставший главным объектом музея Силиконовой долины, после того, как… С помощью нескольких нажатий вы устанавливаете для карманного гида режим менее подробных объяснений.

Когда люди попадают на завод «Нанофаба», наступает торжественная тишина, возникает ощущение погружения в историю. Вы попадаете на родину суперчипа, — первого продукта массового рынка нанотехнологий. Именно огромный объем памяти суперчипов позволил создать первую карманную библиотеку.

Здесь же представлена серия дисплеев, в том числе рабочие копии ранних продуктов. Взяв в руки карманную библиотеку, вы обнаружите, что она не только размером с бумажник, но и весит примерно столько же. Тем не менее, у нее достаточно памяти, чтобы записать каждый том в Библиотеке Конгресса — приблизительно в миллион раз больше емкости персонального

компьютера 1990 года. Она включается легким щелчком, после чего загорается двухпанельный экран, и мир письменных знаний оказывается у вас под рукой. Впечатляюще.

— Ого, ты можешь в это поверить? — говорит другой турист, рассматривая древнюю карманную библиотеку. — Здесь почти нет видео, нет 3D — только тексты, звук и плоские изображения. И стоит дорого! За такие деньги я бы это устройство для своих детей не купил.

Ваш гид тотчас напоминает цену на хороший типовой телевизор 1990 года. Да, это не дешевое производство, обещанное зрелой нанотехнологией, но для библиотеки цена кажется вполне приемлемой. Хм… но как они учитывали авторские права и выплачивали гонорары? Получается, что этот продукт меняет не только технологии…

Нанопроизводство

Но пока подробнее о технологиях. Мы попадаем в рабочий цех, где изготовлялись первые суперчипы для производства дисплеев с применением ранних нанотехнологий. Обстановка здесь удивительно тихая и обычная. Еще в 1980-х и 1990-х годах цеха по производству чипов представляли собой контролируемые чистые помещения со специально оборудованными рабочими местами, которые тщательно продували воздушными потоками, чтобы пыль не попадала на изделия. Рабочие и посетители допускались туда только в халатах и масках. В этой комнате ничего такого нет. Здесь даже немного грязно.

В центре большого квадратного стола стоят полдюжины стальных резервуаров, размером и формой напоминающих старомодные молочные бидоны. Каждый бидон помечен, чтобы различать их содержимое: блоки памяти, блоки передачи данных, интерфейсные блоки. Это составные части, необходимые для создания чипа. Из бидонов выведены прозрачные пластиковые трубки, по которым текут бесцветные или чайного цвета жидкости. Трубки подсоединены к коробкам размером с кулак, установленным над мелкими тарелками, окружающими бидоны. По мере того, как различные жидкости капают в каждую тарелку, венчик, похожий на кухонный смеситель, взбивает жидкость. В каждой тарелке наномашины строят суперчипы.

Работник «Нанофаба», одетый в спецодежду со своим именем на бейдже, подбирает компоненты, чтобы начать строительство нового чипа.

— Это, — говорит он, держа заготовку пинцетом, —

кремниевый чип, похожий на те, что были сделаны по технологии, предшествовавшей прорыву. Здесь, в долине, компании изготавливали такие чипы, сначала выплавляя кремний, потом охлаждали его, распиливали на кусочки, полировали их, а затем пропускали через длинную серию химических и фотографических шагов. В результате всех этих операций на поверхности получали узор линий и капель различных материалов. Даже самые маленькие из этих капель содержали миллиарды атомов. Требовалось несколько капель, работающих вместе, чтобы сохранить один бит информации. Чип такого размера, величиной с ваш ноготь, может хранить менее миллиарда бит. Здесь, в «Нанофаб», в качестве основы для создания нанопамяти использовали только кремниевые чипы. На стене висит картинка, на которой изображена поверхность такого чипа: ни транзисторов, ни схем памяти, только тонкие провода для подключения к нанопамяти, которую мы построили методом «сверху вниз». Нанопамять, только появившись, уже хранила тысячи миллиардов битов. И мы делали их такими, но по тысяче за раз… — он кладет чипы в тарелку, нажимает кнопку, и тарелка начинает наполняться жидкостью.

— Спустя несколько лет, — добавляет он, — мы полностью избавились от кремниевых чипов, — он указывает на табличку, гласящую, что сборка этих чипов началась в 14–15, а закончится в час утра, — мы ускорили процесс изготовления в тысячу раз.

Чипы в тарелках выглядят почти одинаково, за исключением цвета. Новый чип напоминает тусклый металл и представляет собой гладкое прямоугольное пятно, покрытое пленкой из более темного материала. Анимированная блок-схема на стене показывает, как слой за слоем строительные блоки нанопамяти захватываются из раствора и укладываются на поверхность, чтобы создать эту пленку. Гид объясняет, что энергия для этого процесса, как и энергия для молекулярных машин в клетках, поступает от растворенных химических веществ — от молекул кислорода и топлива. Общее количество необходимой энергии невелико, потому что количество получаемого продукта мало: в конце процесса общая толщина структуры нанопамяти — хранилища памяти для карманной библиотеки — составляет одну десятую толщины листа бумаги, площадью меньше, чем почтовая марка.

Молекулярные ассемблеры (сборщики)

Анимированная блок-схема показала, что строительные

блоки для нанопамяти представляют собой большие объекты, содержащие около ста тысяч атомов каждый (требуется некоторое время, чтобы вспомнить, что это все еще субмикроскопично). Процесс сборки в тарелке сложил эти блоки, чтобы обеспечить суперчип суперпамятью, но как были построены сами блоки? Самое трудное в этом молекулярно-производственном бизнесе лежит в основе всего процесса, на стадии, когда молекулы собираются вместе, чтобы соединиться в большие сложные части.

Музей Силиконовой долины предлагает симуляции этого молекулярного процесса сборки без дополнительной оплаты. Из путеводителя вы узнаете, что современные процессы сборки сложны; что более ранние процессы — например, те, которые применял «Нанофаб» — использовали хитроумные, но непонятные инженерные приемы; и что самые простые, самые ранние концепции никогда не применялись. Почему бы не начать с самого начала? За несколько минут вы доберетесь до первого зала музея молекулярного производства, где представлены самые ранние концепций.

И вот мы видим, как несколько человек прогуливаются в свободно сидящих комбинезонах с прикрепленными очками и перчатками, уставившись в пустоту, и молча играют с невидимыми объектами. Ну ладно, почему бы не присоединиться к параду дураков, перешагнув порог в обычном костюме? Очки показывают нормальный мир за дверью и молекулярный мир внутри зала. Теперь вы тоже можете видеть и чувствовать экспонаты, которые представлены на выставке. Это очень похоже на ранее смоделированный молекулярный мир: он поддерживает стандартные настройки размера, силы и скорости. Опять же, атомы кажутся в 40 миллионов раз больше, примерно размером с ваши пальцы. Эта симуляция немного менее тщательна, чем предыдущая — вы можете чувствовать моделируемые объекты, но только руками в перчатках. Опять же, кажется, что все состоит из дрожащих оплавленных мраморных шариков, каждый атом.

— Добро пожаловать, — говорит гид, — в реконструкцию завода по производству молекул 1990 года. Эти исследовательские инженерные проекты никогда не предназначались для фактического использования, но они демонстрируют основы молекулярного производства: изготовление деталей, их тестирование и сборку.

Машины заполняют зал. В целом, обстановка напоминает автоматизированную фабрику 1980-х или 1990-х гг. Кажется достаточно ясным, что должно происходить: большие машины стоят рядом с конвейерной лентой, загруженной наполовину готовыми блоками из какого-то материала (эта установка очень

похожа на Рисунок 2); машины должны выполнять определенную операцию над блоками. Судя по конвейерной ленте, блоки в конечном итоге перемещаются от одной машины цеха к другой, пока не повернут за угол и не переместятся в следующий зал.

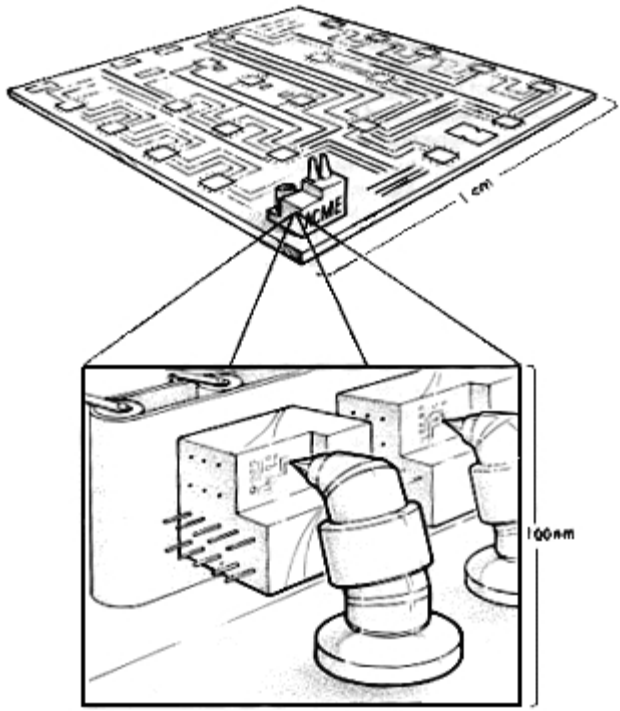


Рисунок 2. СБОРКА ФАБРИКИ НА ЧИПЕ

Завод достаточно большой, чтобы производить более 10 миллионов нанокомпьютеров в день, поместился бы на краю одной из современных интегральных схем. На картинке показана рука ассемблера вместе с заготовкой на конвейерной ленте.

Поскольку это всего лишь имитация, и экспонат не может быть поврежден, вы можете подойти к машине и дотронутся до нее. Она кажется такой же твердой, как стенка нанокомпьютера в предыдущем сеансе. Внезапно вы замечаете что-то странное: никаких бомбардирующих молекул воздуха и никаких капель воды нет, вообще нет никаких свободных молекул. Каждый атом кажется частью механической системы, дрожащей под воздействием тепловых колебаний, но, в остальном, полностью контролируемой. Все здесь похоже на нанокомпьютер или на жесткий маленький механизм; ничто не напоминает свободно свернутый белок или бушующее вещество живой клетки.

Конвейерная лента кажется неподвижной. Через равные

промежутки времени по ленте перемещаются блоки используемого материала: заготовки. Ближайший блок имеет около сотни мраморных шариков в ширину, поэтому он должен содержать что-то вроде 100 x 100 x 100 атомов, а это миллион. Этот блок выглядит странно знакомым, с его стержнями, кривошипом и остальным. Это нанокомпьютер — или, скорее, блокоподобная часть нанокомпьютера, который все еще строится. Вдоль конвейерной ленты с частями нанокомпьютера, стоит ряд огромных манипуляторов. Их стволы поднимаются от пола, толстые, как старые дубы. Даже если они наклоняются, они возвышаются над головой.

— Каждая машина, — говорит гид, — это рука молекулярного ассемблера общего назначения.

Один манипулятор согнут так, что его кончик прижат к блоку на конвейерной ленте. Подойдя ближе, вы видите молекулярную сборку в действии. Рука манипулятора заканчивается устройством размером с кулак с несколькими выступающими шариками, похожими на костяшки пальцев. Прямо сейчас два дрожащих шарика — атомы — вдавливают в небольшую впадину в блоке. Вы видите, как два шарика очень быстро занимают свое место в блоке: идет химическая реакция. Рука ассемблера практически не двигается. Кулак потерял два сустава, а блок нанокомпьютера стал на два атома больше.

Гид утверждает:

— Универсальная концепция ассемблера напоминает, по сути, заводских роботов 1980-х гг. Эта механическая рука, управляемая компьютером, перемещает молекулярные инструменты в соответствии с заданной программой. Каждый инструмент похож на однозарядный степлер или заклепочный пистолет. Он имеет руку для захвата ассемблера и поставляется с небольшим количеством вещества — несколькими атомами — которые он прикрепляет к заготовке с помощью химической реакции.

Это действие похоже на восстановление белковой цепи в предыдущем сеансе.

Молекулярная точность

Казалось, что атомы достаточно легко встают на свои места; могут ли они так же легко выпрыгнуть обратно? К этому времени рука ассемблера отошла от блока нанокомпьютера, оставив небольшой зазор, так что вы можете дотянуться и дотронуться до недавно добавленных атомов. Но когда вы сильно нажмете, как

только сможете (вашими имитированными пальцами, сильными как сталь), атомы не сдвинутся с места на заметное расстояние. Сильные молекулярные связи удерживают их вместе.

Карманный гид, который пользуется для выполнения своей задачи мощью тысячи суперкомпьютеров 1990-х годов, замечает: «Молекулярные связи удерживают детали вместе. В сильных, стабильных материалах атомы либо связаны, либо нет, промежуточных состояний не существует. Ассемблеры работают, создавая и разрывая связи, поэтому каждый их шаг либо полностью успешен, либо полностью провален. В предпрорывном производстве, любые детали всегда изготовлялись с небольшими погрешностями. Это могло привести к ухудшению качества продукции. На молекулярном уровне эти проблемы исчезают. Поскольку каждый шаг совершенно точен, маленькие ошибки не могут складываться. Процесс либо работает, либо нет».

Но что можно сказать о тех упомянутых полных неудачах? Охваченный научным любопытством, вы подходите к следующему ассемблеру, хватаете наконечник и встряхиваете его. Почти ничего не происходит. Тогда вы толкаете еще сильнее, изо всех сил, наконечник перемещается примерно на одну десятую атомного диаметра, а затем возвращается назад.

— Тепловые колебания могут вызвать ошибки, заставляя детали собираться вместе и образовывать связи в неправильном месте, — отмечает экскурсовод. — Они заставляют гибкие объекты изгибаться сильнее, чем жесткие, и поэтому руки ассемблера были изготовлены толстыми и короткими, чтобы сделать их очень жесткими. Вероятность ошибки может быть сведена к одной на триллион, и поэтому небольшие продукты могут быть совершенно стандартными и идентичными. Крупные изделия могут быть почти идеальными, отличаясь всего несколькими атомами, попавшими не на свое место.

Это должно гарантировать высокую надежность. Как ни странно, большинство вещей, которые вы увидели готовыми, выглядели довольно обычными — не гладкими, блестящими и совершенными, а шероховатыми и кустарными. Словно они изготовлены вручную. Гладкие, блестящие вещи больше не должны никого впечатлять.

Молекулярная робототехника

И вот рука ассемблера переместилась на ширину нескольких атомов. Через полупрозрачную поверхность этой руки видно, что она полна механизмов: крутящихся валов, шестерен и больших,

медленно вращающихся колец, которые заставляют двигаться суставы. Вся система представляет собой огромную шарнирную руку робота. Рука большая, потому что ее самые маленькие детали размером с атом, а механизм внутри, который заставляет ее двигаться и изгибаться, состоит из многих различных частей. Внутри работает другой механизм: рука там заканчивается отверстием, и вы можете видеть, как старый, отработавший свое молекулярный инструмент втягивается через трубку посередине.

Терпение, терпение. В течение нескольких минут новый инструмент возвращается в трубу. В конце концов, он достигает своей цели. Валы и шестерни вращаются, а зажимы фиксируют инструмент в нужном положении. Другие валы вращаются, и рука медленно прижимается к заготовке теперь уже на новом месте. И снова рука подергивается, некоторое количество атомов перемещается, а блок становится немного больше. Цикл повторяется снова. Эта огромная рука кажется удивительно медленной, но стандартные настройки моделирования сдвинули скорости более чем в 400 миллионов раз. Несколько минут времени моделирования соответствуют менее чем одной миллионной секунды реального времени, поэтому эта кажущаяся неповоротливой рука выполняет около миллиона операций в секунду.

Посмотрев вниз, на основание руки ассемблера, вы можете разглядеть еще больше механизмов, скрытых под полом: электрические двигатели вращаются, нанокомпьютер шумит и стержни яростно перемещаются. Во время каждого цикла работы тяжелой руки все эти штанги и шестерни быстро двигаются, множество раз скользя и поворачиваясь. Кажется, что это очень неэффективно; механические колебания должны генерировать много тепла, поэтому электродвигатели будут потреблять много энергии. Иметь компьютерное управление каждой рукой сейчас гораздо неудобнее, чем это было в допрорывные годы. Тогда рука робота была большой и дорогой, а компьютер — дешевым чипом; но сейчас компьютер больше, чем рука. Должен быть лучший способ, но мы пока в музее древних концепций.

Сборка строительных блоков

Куда попадают блоки, когда ассемблеры заканчивают свою работу? Следуя за конвейерной лентой мимо дюжины рук, вы доходите до конца зала, поворачиваете за угол и оказываетесь на балконе с видом на более обширный зал. Здесь блок сходит с конвейерной ленты и оказывается в сложном приспособлении.

Его части движутся, и огромная рука нависает над ним, как строительный кран. Через мгновение гид заговорил и подтвердил ваши подозрения: «После изготовления каждый блок тестируется. Большие манипуляторы отбирают безошибочно изготовленные блоки. В этом зале большие руки собирают почти тысячу блоков различных видов, чтобы сделать полноценный нанокомпьютер».

В большом зале имеется собственная конвейерная лента, по которой движутся частично собранные нанокомпьютеры. Вдоль нее установлен ряд огромных манипуляторов, способных раскачиваться взад и вперед и дотягиваться до меньших конвейерных лент, доставлять миллионоатомные блоки из тестировочных станций и соединять их с другими заготовками нанокомпьютера в стадии строительства. Конвейерная лента проходит по всей длине зала, и в конце полностью собранные нанокомпьютеры поворачивают за угол в еще более грандиозный зал.

Наблюдая зал в течение нескольких минут заключительной сборки, вы замечаете, что ничего не движется. И терпеливое ожидание не поможет: со скоростью, с которой меньшие манипуляторы двигались в предыдущем зале, сборка каждого блока должна занимать месяцы. Большие манипуляторы все это время находятся в простое. Создание компьютера от начала до конца может занять ужасно много времени. Возможно, даже столько, сколько длится мгновение ока.

Молекулярные ассемблеры изготовляют блоки, из которых блочные ассемблеры собирают компьютеры. А далее системные ассемблеры вставляют эти компьютеры в изготавливаемую продукцию. По крайней мере, естественный путь от молекул до создания крупных продуктов кажется достаточно ясным. Если бы автомобиль был собран обычными роботами из тысячи узлов, каждый из которых был собран меньшими роботами из тысячи исходных деталей и так далее, вниз и вниз, то всего лишь десять уровней процесса сборки отделили бы автомобили от молекул. Возможно, завернув еще за несколько углов и попав в другие, еще большие залы, вы увидите постпрорывной автомобиль в процессе создания, с неизвестными пока двигателями и удобными сиденьями, которые были соединены вместе в процессе, длящемся век, в зале настолько огромном, что Тихий океан показался бы рядом с ним лужей…

Всего десять шагов масштабирования; восемь, начиная с блоков, таких же больших, как те, что сделаны в предыдущем зале. Молекулярный мир кажется ближе, если смотреть на него таким образом.

Возвращаясь в этот зал, вы задаетесь вопросом, как начинается процесс. В каждом цикле этого медленного производства каждый молекулярный ассемблер получает исходный материал через трубу откуда-то из-под пола, и именно там начинается история молекулярной точности. И тогда вы спрашиваете:

— Откуда берутся инструменты?

Гид отвечает:

— Вы можете воспользоваться лифтом слева от вас.

Выйдя из лифта и спустившись в подвал, вы видите широкий зал, полный маленьких конвейерных лент и шкивов; большая труба расположена посередине. Табличка на стене гласит: «Концепция механохимической обработки, около 1990 года». Как обычно, все перемещения кажутся довольно медленными, но в этом зале все, что должно двигаться, явно движется. Главный поток удаляется от трубы. И, через несколько ступеней, устремляется вверх через потолок к залу ассемблеров.

Подойдя к трубе, можно видеть, что она почти прозрачна. Внутри хаотически носятся крошечные молекулы: стенка трубы является границей между свободными и контролируемыми молекулами, перемешивание не допускается. В этой симуляции ваши пальцы размером с мелкие молекулы. Несмотря на все усилия, провести пальцем по стенке трубы не удается. Через каждые несколько шагов вдоль трубы расположены соединительные втулки, — корпус с вращающейся с помощью механического привода деталью. В движение ее приводит жидкость внутри трубы и приводные ремни на шкивах, встроенных в корпус. Трудно точно понять, что происходит.

Гид говорит:

— Выемки на роторе захватывают отдельные молекулы из жидкости в трубе. Каждая такая выемка имеет размер и форму, точно соответствующую только одному из нескольких различных видов молекул в жидкости, так что процесс состоит в правильном отборе. После того, как захваченные молекулы попали в нужные отверстия на приводном ремне, который соединен со шкивом…

— Хватит, — говорите вы. — Все понятно. Здесь отбирают молекулы и затем направляют в нужное место сборки. Надо полагать, эти машины способны сортировать молекулы, чтобы быть уверенным в том, что нужные молекулы попали куда следует.

Приводные ремни петляют взад и вперед, перенося большие, узловатые массы молекул. Многие шкивы — крутятся? —

прижимая два ремня друг к другу внутри корпуса с помощью вспомогательных роликов. Пока вы смотрите на один из них, гид говорит: «Каждый нарост на ремне — это устройство для механохимической обработки. Когда два нароста на разных ремнях прижаты друг к другу правильным образом, они осуществляют перенос молекулярных фрагментов друг к другу посредством механически принудительной химической реакции. Таким образом, небольшие молекулы разрушаются, рекомбинируются и, наконец, соединяются с молекулярными инструментами, используемыми в ассемблерах в зале выше. В этом устройстве ролики создают давление, равное давлению, действующему на полпути к центру Земли, ускоряя реакцию, которая…»

— Хорошо, хорошо, — говорите вы.

Химики еще в старые времена умудрялись создавать удивительно сложные молекулы, просто смешивая различные химические вещества в определенном порядке при правильных условиях. И здесь молекулы, безусловно, могут быть собраны вместе нужным образом, тем более, что условия контролируются гораздо лучше. Само собой разумеется, что этот тщательно разработанный лабиринт шкивов и ремней должен сделать работу по обработке молекул лучше, чем это можно сделать в пробирке, полной посторонних жидкостей. Из жидкости через сортировщик в мельницу, не используя инструменты: это, кажется, и есть история обработки молекул. Все приводные ремни — это петли, поэтому механизм просто крутится, перенося и трансформируя молекулярные части.

За пределами антиквариата

Эта система приводных ремней кажется ужасно простой и эффективной по сравнению с тяжелыми манипуляторами, приводимыми в движение замечательными компьютерами в зале выше. «Зачем останавливаться на создании простых инструментов»? Должно быть, вы пробормотали это, потому что гид снова заговорил и сказал:

— В музее представлен специальный ассемблер, демонстрирующий раннюю концепцию молекулярного производства, которая использует принципы этой системы обработки молекул для создания больших, сложных объектов. Если система строит только один продукт, нет необходимости применять компьютеры и с помощью манипуляторов перемещать детали. Гораздо эффективнее построить машину, в которой все

просто движется с постоянной скоростью при помощи приводных ремней, добавляя мелкие детали к более крупным, а затем, объединяя их, как вы это уже видели.

Это действительно кажется более разумным способом массового производства одинаковых продуктов, но это ведь простое повторение старых технологий. Шестерни приспособлены для операций с соединенными атомами, приводные ремни работают с группами молекул. Для этого нужны валы, шкивы, машины, еще больше машин. В нескольких местах атомы сортируют, чтобы подготовить деталь или сделать готовый продукт. Катится, катится, пыхтит, пыхтит, оп, щелчок, затем опять катится и пыхтит.

Вы выходите из зала моделирования и спрашиваете:

— Не пропустил ли я в этой экскурсии по этому молекулярному производству что-нибудь важное?

— Да. Внутренние работы сборочных манипуляторов с приводными валами, червячными и зубчатыми передачами. Использование реакции Дильса-Альдера, межфазные свободно-радиальные цепные реакции и образование дативных связей для соединения блоков вместе на поздних стадиях сборки. Различные виды механохимической обработки для получения реактивных молекулярных инструментов. Использование каскадных методов в обеспечении подачи необходимых молекул с почти абсолютной надежностью. Различие между эффективными и неэффективными стадиями молекулярной обработки. Использование избыточности для обеспечения надежности в больших системах, несмотря на случайные повреждения. Современные методы построения крупных объектов из более мелких деталей. Современные электронные нанокомпьютеры. Современные методы…

— Довольно! — говорите вы, и гид замолкает, когда вы бросаете его в мусорную корзину.

Полный курс молекулярного производства — это не то, о чем вы хотите узнать прямо сейчас; общая идея кажется достаточно ясной. Пришло время еще раз взглянуть на мир в нормальном масштабе. Дома, дороги, здания, даже ландшафт там, за куполом музея, выглядят иначе — менее многолюдным, асфальтированным и вспаханным, чем вы помните. Но почему? Книги по истории (ну, они больше, чем просто книги) говорят, что молекулярное производство имело большое значение. Возможно, теперь изменения будут иметь больше смысла. Да, пора уходить.

Когда вы бросаете свой комбинезон, оснащенный очками и перчатками, в мусорную корзину, поразительно красивая темноволосая женщина берет свежий с полки. На ней куртка с

надписью «Desert Rose NanoManufacturing».

— Вам понравилось? — спрашивает она с улыбкой.

— Я удивлен, — отвечаешь ты.

— Да, — соглашается она. — Я встречала подобные симуляции, когда еще училась на первом курсе молекулярного производства. И поклялась, что мои разработки никогда не будут столь неуклюжими! Вся эта экспозиция заставляет вспоминать далекие времена. Хочу посмотреть, действительно ли все так плохо, как мне кажется сейчас.

Она входит в имитационный зал и закрывает дверь.

Сырая технология

Как показывает симуляция в музее Силиконовой долины, молекулярное производство будет работать так же, как и обычное, но, используя устройства настолько маленькие, что каждая свободная молекула загрязняющего вещества будет похожа на кирпич, брошенный в станок. Джон Уокер из «Autodesk», ведущей компании в области автоматизированного проектирования, отмечает, что нанотехнологии и сегодняшние грубые методы отличаются очень сильно:

«Технология никогда прежде не имела такого точного контроля. Все наши современные технологии являются затратными. Мы берем большой кусок материала и обрабатываем его до тех пор, пока не остаемся с предметом, который хотим получить. Или собираем из деталей без учета структуры на молекулярном уровне».[1]

Молекулярное производство организует атомы в продукцию симфонической сложности, в то время как современное производство в основном только производит громкие звуки. Эти образные шумы иногда слишком буквальны: трещина в металлической ковке растет под напряжением, крыло выходит из строя, и пассажирский самолет падает. Химическая реакция выходит из-под контроля, температура и давление нарастают, и сельскую местность сотрясает ядовитый взрыв. Нельзя получить нужное лекарство, сердце останавливается, и больничная машина, контролирующая работу сердца, пронзительным воплем сигнализирует об этом.

Сегодня, мы делаем много вещей из металлов, подвергая их механической обработке. С точки зрения нашего стандартного, смоделированного молекулярного мира, типичная металлическая деталь — это часть местности, путь через которую занимает много дней. Сам металл слаб по сравнению со связями белковой цепи или другими жесткими наномеханизмами: твердая сталь не прочнее ваших смоделированных пальцев, а атомы на ее поверхности можно передвигать голыми руками. Стоя на куске металла, обрабатываемого на токарном станке, вы увидите, как режущее лезвие проползает несколько раз в год, как величественный плуг размером с горный хребет. Каждое его появление вспахивает полосу металлического ландшафта, оставляя неровную долину достаточно широкую, чтобы там поместился город. Так выглядит обработка металлов с нанотехнологической точки зрения: это процесс, который создает грубые формы из внутренне слабых материалов.

Сегодня электроника использует кремниевые чипы. Мы уже видели ландшафт готовой микросхемы. Во время производства металлические детали будут создаваться многовековым дождем из атомов металла, а впадины многовековым погружением в кислотное море. С точки зрения нашего моделирования, процесс производства будет напоминать геологические изменения с медленным наслоением осадочных отложений, чередующихся с годами эрозии. Термин нанотехнология иногда используется для обозначения мелкомасштабной микротехнологии. Но разница между молекулярным производством и этим видом изменения микроландшафта похожа на разницу между производством часов и работой бульдозера.

Сегодня химики создают молекулы с помощью химических растворов. Мы видели, как выглядит жидкость в нашем первом моделировании, когда молекулы сталкиваются, кувыркаются и разлетаются, как ассемблеры могут вызывать химические реакции, механически соединяя молекулы, но точно так же реакции могут происходить, когда молекулы случайно сталкиваются в результате тепловых колебаний и движения в жидкости. Действительно, многое из того, что мы знаем сегодня о химических реакциях, изучено во время наблюдений за этими процессами. Химики получают большие молекулы, смешивая маленькие молекулы в жидкости. Выбирая нужные молекулы и создавая подходящие условия, они могут удивительно точно контролировать получение искомых результатов: только некоторые пары молекул будут реагировать друг с другом, и то исключительно определенным образом.

Использовать химию таким образом, однако, это все равно, что пытаться собрать модель автомобиля, положив части в коробку и встряхивая их. Это возможно только со специально подобранными деталями, и трудно рассчитывать сделать что-нибудь очень сложное. Химики сегодня считают трудной задачей создание точной трехмерной структуры, имеющей сто атомов, а создание структуры из тысячи атомов стало бы большим достижением. Молекулярное производство, напротив, будет регулярно собирать вместе миллионы или миллиарды атомов. Основные химические принципы останутся прежними, но контроль и надежность будут значительно выше. Это разница между слепым встряхиванием деталей и их тщательной сборкой часовщиком.

Современные технологии не позволяют полностью контролировать структуру вещества. Молекулярное производство сможет это делать. Современные технологии дали нам компьютеры, космические корабли, водопровод и другие чудеса

современной эпохи. Завтрашний день позволит создавать гораздо больше разнообразных вещей. Простое Дело. Умное Дело.

Сегодняшняя технология в основном работает с веществом в нескольких основных формах: газообразной, жидкой и твердой. Хотя каждая форма имеет много разновидностей, все они сравнительно просты.

Газы, как мы видели, состоят из молекул, которые сталкиваются и разлетаются в пространстве. Газ будет давить на стенки сосуда, в котором находится, а если их нет, расширяться без ограничений. Газы могут поставлять определенное сырье для наномашин, а наномашины могут использоваться для удаления загрязняющих веществ из воздуха и превращения их во что-то другое. Газам не хватает структуры, поэтому они останутся простым сырьем.

Жидкости в чем-то похожи на газы, но их молекулы сцепляются вместе, образуя связный сгусток, который не будет расширяться дальше определенного предела. Жидкости — хорошие источники сырья для наномашин, потому что они более плотные и могут переносить широкий спектр топлива и сырья в растворе (труба в зале молекулярной обработки содержала жидкость). Наномашины могут очищать загрязненную воду так же легко, как воздух, удаляя и трансформируя вредные молекулы. Жидкости имеют более сложную структуру, чем газы, но нанотехнологии будут использовать в основном твердые тела.

Твердые тела разнообразны. Твердое масло состоит из молекул более твердых, чем сталь, но молекулы соединяются при помощи более слабых сил молекулярной прилипчивости. Нагревание увеличивает тепловые колебания и заставляет твердую структуру распадаться на капли жидкости. Из маслоподобных материалов получились бы плохие наномашины. Металлы состоят из атомов, удерживаемых вместе более мощными силами, и поэтому они структурно тверже и способны выдерживать более высокие температуры. Однако эти силы не очень согласованы, и поэтому плоскости атомов металла под давлением могут проскальзывать относительно друг друга; вот почему ложки сгибаются, а не ломаются. Эта способность к скольжению делает металлы менее хрупкими и легче формуют нужные формы (при плавлении), но это также ослабляет их. Только самые прочные и твердые, с самой высокой температурой плавления металлы стоит рассматривать как части наномашин.

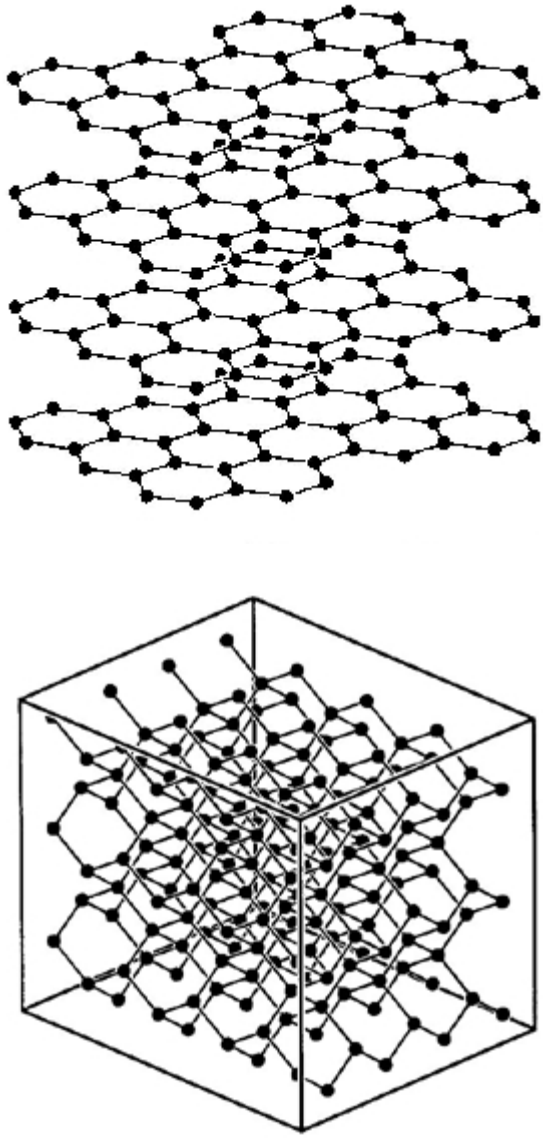


Рисунок 3. УГЛЕРОД — МЯГКИЙ И ТВЕРДЫЙ

Вверху находится графит — материал, используемый в карандашах, он состоит из атомов углерода. Внизу изображена структура алмаза — это те же атомы углерода, составляющие другую структуру.

Алмаз состоит из атомов углерода, удерживаемых вместе сильными направленными связями, подобно связям вдоль оси белковой цепи. (См. рис. 3) Эти направленные связи затрудняют проскальзывание плоскостей атомов, что делает алмаз (и

подобные ему материалы) действительно очень прочными — в десять-сто раз прочнее стали. Но плоскости не могут легко скользить, поэтому, когда материал повреждается, он не сгибается, а ломается. Крошечные трещины могут легко расширяться, заставляя большой объект становиться хрупким. Стекло похожий материал: стеклянные окна не кажутся прочными, — и каждая царапина делает стекло еще менее прочным — но тонкие, совершенные стеклянные волокна широко используются, чтобы сделать композитные материалы прочнее и легче, чем сталь. Нанотехнологии смогут использовать алмаз и подобные прочные материалы, изготовляя небольшие, безупречные волокна и компоненты.

В настоящее время инженеры только начинают использовать алмазы. Пионером технологии применения алмазов при низком давлении является Япония. Японская компания продает динамик с отличной высокочастотной характеристикой — конус динамика усилен легкой, жесткой пленкой алмаза. Алмаз — это необыкновенный материал, который можно получить из дешевых материалов, например, из природного газа. Американские компании только пытаются наверстать упущенное.

Все эти материалы просты. Более крупные структуры обладают свойствами сложнее, это позволяет точнее представить, как молекулярное производство будет использовать материалы.

Что делать, если вы собрали атомы углерода в длинные цепи с боковыми группами, немного похожими на белковую цепь, а затем создали из них большую трехмерную структуру? Если бы цепи были изогнуты так, что не могли плотно упаковываться, они бы свернулись клубком и схлопнулись почти как молекулы жидкости, но сильные связи сохранили бы общую структуру неповрежденной. Растягивание будет выпрямлять цепи, но их колебательные движения будут сворачивать их обратно. Такая структура была сделана: она называется резиновой.

Резина разрывается в основном потому, что ее структура нерегулярна. При растяжении сначала не выдерживает одна цепь, затем другая, потому что все они не натягиваются одновременно, чтобы совместно выдержать силу натяжения. Материал с лучшими свойствами сначала был бы мягким, как резина, но при сильном растягивании оказывался бы прочнее стали. Молекулярное производство может сделать такие вещи.

Природный мир содержит множество хороших материалов — целлюлозу и лигнин в древесине, белки прочнее стали в шелке паука, твердую керамику в песчинках и многое другое. Многие продукты молекулярного производства будут отличаться большой долговечностью как песок. Другие будут разработаны для легкой

переработки как дерево. Некоторые из них могут быть предназначены для использования там, где их можно будет потом утилизировать. В последнем случае будут использоваться нанотехнологичные биоразлагаемые материалы. Можно предположить, что почти все продукты от обуви до компьютерных наномашин может быть сделан таким образом, чтобы они могли использоваться в течение длительного времени, а затем довольно быстро распадались бы на молекулы и другие материалы, которые обычно находятся в почве.

Это только намек на то, что молекулярное производство сделает возможным, обеспечивая лучший контроль над структурой твердого вещества. Но самыми впечатляющими достижениями нанотехнологий будут не материалы из сверхпрочных структур, не улучшенная резина, а простые биоразлагаемые материалы: однородные, повторяющиеся структуры, не сильно отличающиеся от обычных материалов. Эти материалы будут «глупыми». Когда их толкают, они сопротивляются или растягиваются и отскакивают назад. Если вы направите на них свет, они передадут его, отразят или поглотят. Но молекулярное производство может сделать гораздо больше. Вместо того чтобы использовать простые молекулы, оно может создавать материалы из триллионов двигателей, храповиков, излучателей света и компьютеров.

Мышцы умнее резины, потому что они содержат молекулярные машины: можно сказать, что они способны сокращаться. Продукты молекулярного производства могут включать материалы, способные изменять форму, цвет и другие свойства по команде. Когда в пылинке удастся разместить суперкомпьютер, материалы можно будет сделать умными, медицина станет очень сложной, и мир изменится. Умные материалы будут рассмотрены в главе 8.

Идеи и критические замечания

Мы только что увидели картину молекулярного производства (одного вида) и того, что оно может сделать (в общих чертах). Теперь давайте посмотрим на саму идею нанотехнологии: откуда она взялась, и что об этом думают эксперты? В следующей главе будет рассказано о представлениях исследователей, которые занимаются новыми технологиями.

Происхождение

Идея молекулярной нанотехнологии, как и большинство идей, имеет корни, уходящие в далекое прошлое. В Древней Греции Демокрит предположил, что мир построен из прочных, невидимых частиц — атомов, строительных блоков для твердых объектов, жидкостей и газов. За последние сто лет ученые узнали очень много об этих строительных блоках, а химики разработали множество способов объединять их, создавая новые вещи. Десятилетия назад биологи обнаружили молекулы, которые делают сложные вещи; они назвали их «молекулярными машинами».

Физик Ричард Фейнман был провидцем миниатюризации, он первым указал на возможность создания молекулярной нанотехнологии: 29 декабря 1959 года в послеполуденной речи на ежегодном собрании Американского Физического Общества он предложил использовать большие машины для создания меньших машин, которые могли бы сделать еще меньшие машины, работающие сверху вниз от макромира до микромира. В конце своего выступления он предсказал возможность управлять движением отдельных атомов: «принципы физики, насколько я понимаю, ничего не говорят против возможности маневрирования вещами атом за атомом». Он предсказал создание молекул, четко указывая направление, взятое современной концепцией нанотехнологии: «но интересно, что в принципе было бы возможно (я так думаю) для физика синтезировать любое химическое вещество, которое химик пожелает. Оставьте заказ, и физик их синтезирует. Как? Переместите атомы туда, куда нужно химику, и таким образом вы создадите необходимое вещество».

Несмотря на это ясное указание на потенциально революционную область, никто не заполнил концептуальный разрыв между миниатюрными машинами и химическими веществами. Не было выработано четкой концепции создания

молекулярных машин, способных выпускать подобные себе машины, не было определено понятие управляемого молекулярного производства. Оглядываясь назад, можно задаться вопросом, почему этот пробел так долго заполнялся? Сам Фейнман не следил за этим, говоря, что способность маневрировать отдельными атомами «на самом деле бесполезна», поскольку химики придумают традиционные, массовые способы производства новых химических веществ. Для исследователя, чей основной интерес связан с физикой, он внес большой вклад, став первым, указавшим на перспективное направление движения вперед. Однако идея молекулярных машин для молекулярного производства была забыта на десятилетия.

Согласно современным представлениям молекулярная нанотехнология больше похожа на расширение химии, чем на расширение миниатюризации. Инженер-механик, изучая нанотехнологии, может спросить: «как можно сделать машины такими маленькими»? А химик спросил бы: «как можно молекулы сделать такими большими»? У химика, впрочем, есть вопрос лучше. Нанотехнология — это прежде всего не миниатюризация машин, а распространение точного контроля молекулярной структуры на все большие и большие масштабы. Нанотехнология — это создание (точное) больших вещей.

Технологии — Функции — Молекулярные примеры

распорки, балки, казины — передача силы, сохранение позиции — клеточные стенки, микротрубочки

кабели — передача напряжения — коллаген, шелковые нити

крепежные детали, клей — соединение деталей — межмолекулярные силы

соленоиды, приводы — перемещение деталей — мышечный актин, миозин

двигатели — поворотные валы — жгутиковый мотор

приводные валы — передача крутящего момента — бактериальные жгутики

подшипники — опорные подвижные части — отдельная связь

фиксаторы — удержание заготовок — ферментативное связывание

инструменты — обработка заготовок — ферменты,

активные молекулы

поточные линии — прибор управления — ферментные системы, рибосомы

цифровое управление системами — хранение и чтение программ — генетическая система

Природа дает наиболее очевидные ключи к тому, как это можно сделать, и именно пополняющаяся научная литература о естественных молекулярных машинах подтолкнула одного из авторов (Дрекслера) предложить молекулярную нанотехнологию, описанного здесь вида. Стратегия достижения цели стала частью концепции: строить все более сложные молекулярные машины из простых частей. В том числе молекулярные машины, способные построить больше молекулярных машин. В чем состоит мотивация изучения этого процесса и цель публикации этой книги? В основном страх перед перспективой оказаться в мире, в который могут ворваться неконтролируемые новые технологии, вызвав уродливые последствия.

Эта концепция и первоначальная исследовательская работа стали развиваться в начале 1977 года в MIT; первая техническая публикация появилась в 1981 году в Трудах Национальной академии наук. В течение многих лет MIT оставался центром размышлений о нанотехнологиях и молекулярном производстве: в 1985 году в MIT была создана исследовательская группа по нанотехнологиям; вскоре она инициировала ежегодную серию лекций, которая к 1990 году превратилась в двухдневный симпозиум.

Первая книга на эту тему, «Машины творения», была опубликована в 1986 году. В 1988 году на кафедре компьютерных наук Стэнфордского университета впервые начали преподавать курс молекулярных нанотехнологий. В 1989 году там же состоялась первая крупная конференция по этому вопросу, организованная Институтом Форсайта и глобальной деловой сетью. Предстоящая публикация технической книги, описывающей нанотехнологии — от молекулярно-механических и квантово-механических принципов до сборочных систем и изделий — поможет преподавать этот предмет, и станет основой для других подобных курсов в колледжах.

Параллельно с развитием и распространением идей о нанотехнологиях и молекулярном производстве — идей, которые пока остаются чистой теорией, однако хорошо обоснованны — ученые и инженеры, работающие в лабораториях над созданием реальных инструментов и оценкой возможностей, стали пионерами на пути к практическому созданию нанотехнологии.

Исследования прошли долгий путь с середины 1980-х годов, как мы увидим в следующей главе. Но, как и следовало ожидать в случае со сложной новой идеей, которая, если реализуется, разрушит многие существующие планы и ожидания, не обошлось без возражений.

«Это не сработает»

Все могло бы быть намного проще, если бы идеи о нанотехнологиях имели какой-то фатальный изъян. Если бы молекулы нельзя было использовать для создания машин. Или машины не могли бы быть использованы для создания вещей. Тогда мы могли бы продолжать развивать наши старые технологии: нашу медицину, которая не исцеляет, наши космические корабли, которые не открывают новые границы, наши нефтяные кризисы, наше загрязнение и все ограничения, которые мешают нам заменить знакомые проблемы неизвестными. Большинство новых идей ошибочны, особенно если они претендуют на радикальные изменения. В этом есть свой смысл — надеяться, что они ошибочны. Из многолетних дискуссий с химиками, физиками и инженерами можно составить внушительный список основных, критических вопросов о том, будут ли работать нанотехнологии. Вопрошающие, как правило, были удовлетворены ответами.

«Все испортят тепловые колебания»?

Самые ранние сценарии описывают природу тепловых колебаний и проблемы, которые они могут вызвать. Проектирование наномашин, достаточно прочных и жестких, способных надежно работать, несмотря на тепловые колебания, является подлинной инженерной задачей. Но для расчета проектных заданий обычно требуется соблюдать простые хрестоматийные принципы, и, следует отметить, что все они могут быть применены к новым технологиям, о которых идет речь в этой книге.

«Все испортит квантовая неопределенность»?

Квантовая механика говорит, что частицы должны быть описаны как небольшие облака вероятностей, а не как точки с

точно определенным местоположением. Именно поэтому атомы и молекулы в моделировании казались такими мягкими и гладкими: их электроны размазываются по всему объему молекулы, и эти электронные облака плавно и мягко сужаются к краям. Положение атомов неопределенно, но это небольшой эффект по сравнению с тепловыми колебаниями. Опять же, в данном случае хорошо применяются простые известные принципы, и хорошо сделанные молекулярные машины будут работать.

«Все испортят свободные молекулы»?

Химики работают со свободными молекулами в жидкостях, и они, естественно, склонны представлять себе молекулы, свободно передвигающимися. Можно построить наномашины и молекулярно-производственные системы, которые работают в такой среде (биологические механизмы являются доказательством такой возможности), но в долгосрочной перспективе в этом не будет необходимости. Симуляция Кремниевой долины дает правильную идею: системы могут быть построены без свободных молекул, что делает наномеханическое конструирование намного проще. Если все без исключения молекулы не свободны внутри машины, то откуда возьмутся свободные молекулы, чтобы создать проблемы?

«Все испортит химическая нестабильность»?

Химики проводят химические реакции, а это значит, что они имеют навыки работы с вступающими в реакции, нестабильными молекулами. Однако, многие молекулы могут находиться рядом со своими соседями в течение миллионов лет, не вступая с ними в реакцию. Это известно как из теории химии, так и из изучения молекул, содержащихся в древних породах. Наномашины могут быть построены из наиболее стабильных структур. Единственным необходимым исключением является молекулярная сборка, где молекулы должны реагировать, но даже в этом случае молекулы должны быть под контролем и могут быть использованы только там и тогда, когда они необходимы для производства.

«Это слишком сложно, как и биология»?

Самый простой способ объяснить молекулярное производство — это сказать, что оно чем-то похоже на молекулярную биологию: маленькие, сложные молекулярные устройства работают совместно, чтобы изготовлять вещи и выполнять различные работы. Но надо сказать, что молекулярное производство отличается от биологического в каждой детали и в теории, и на практике: сравните нанокомпьютеры, ассемблеры и конвейерные ленты, описанные выше, с бесформенной, бурлящей живой клеткой, описанной в предыдущей главе. Да. Биология сложна, странна и удивительна. Инженерам вовсе не нужно понимать, что такое жизнь, а тем более дублировать ее, чтобы построить фабрику молекулярного масштаба.

«Я не вижу в этом ничего плохого. Но тут замешены такие разные научные дисциплины. Скорее всего, есть проблемы, которые я не заметил»?

Нанотехнологии — это, по сути, брак химии и машиностроения, в котором, как всегда, главенствует физика. Конечно, это делает окончательную оценку трудной для понимания большинству современных специалистов, потому что каждая из этих областей преподается изолировано и обычно используется отдельно. Многие узкие специалисты оказываются не в состоянии оценить предложения, которые поступают из других дисциплин. Если их попросят сделать это, они заявят о чувстве дискомфорта, потому что, хотя и не могут указать на какие-либо конкретные проблемы, они не в состоянии оценить новую концепцию на слух. Это под силу только ученым и инженерам, имеющим опыт работы на стыке дисциплин и возможность обсуждать проблему со специалистами из других областей. С некоторыми из них мы познакомимся в главе 4.

«А это сработает»?

Когда физики, химики, биологи, инженеры и компьютерщики оценивают те части нанотехнологии, которые входят в их дисциплины, они соглашаются: ни в коем случае это не потребует введения новых принципов и не нарушит физических законов. Возможно, в течение многих лет некоторые эксперты будут продолжать выражать свое несогласие, но консенсус среди тех, кто потратил время на изучение фактов, будет достигнут. Молекулярная нанотехнология полностью попадает в сферу возможного.

«Наверное, это сработает. Но разве это не приведет к

ужасным последствиям? Стоит ли начинать»?

Если это означает, что «эти новые технологии могут легко принести гораздо больше вреда, чем пользы», тогда, действительно, не существует никаких разумных аргументов, потому что никто не согласится просто так уничтожить мир.

Если это означает, что «эти новые технологии, безусловно, принесут больше вреда, чем пользы», то мы не согласны: они способны принести много хорошего, а значительного вреда можно избежать, и было бы слишком смело объявлять любой такой результат «определенным».

Если это означает, что «этих новых технологий следует избегать», то мы спрашиваем: «как, с какими рисками и с какими последствиями»? В главах 12 и 13 сообщается, что безопаснее ехать на звере, чем висеть на его хвосте, пока другие толпятся в безопасности.

Если это означает: «не думай об этом и не описывай это», тогда мы отвечаем: «как еще мы можем разобраться с новыми технологиями и принимать решения»?

Возросшие человеческие способности обычно использовались для нанесения ущерба окружающей среде и ведения войны. Даже грубые технологии двадцатого века привели нас на край пропасти. Вполне естественно чувствовать себя озабоченным (или напуганным) перспективой, которая обещает (или угрожает) расширить человеческие способности за пределы большинства прошлых мечтаний (или кошмаров). Лучше испытывать все эти чувства (и хорошие, и плохие), объединять и умерять эти чувства, а также выбрать такой план действий, при котором плохие результаты менее вероятны. Мы убеждены, что лучше всего сосредоточиться на потенциальном благе, предупреждая о потенциальном зле.

«Но разве это произойдет при нашей жизни»?

Если это говорят люди со слабым здоровьем, их можно оправдать. Мнение остальных вполне может оказаться ошибочным. Было бы излишне оптимистично думать, что возможные выгоды не за горами, разумнее предположить, что их придется долго ждать. С другой стороны, было бы наивно утверждать, что проблемы с новыми технологиями возникнут когда-нибудь потом. Пожалуй, благоразумнее считать, что они проявятся совсем скоро. Какими бы хорошими или плохими ни были постпрорывные возможности, неопределенность

предстоящего перехода будет представлять реальную опасность. Поэтому мы приглашаем читателей подумать о том, «что если»? Что принесут нам новые технологии? Было бы неблагоразумно слушать убаюкивающий звук обещания «не при нашей жизни».

«Даже сегодня общественное признание грядущего освоения человеком космоса идет медленно. Это считается событием, которое могут увидеть наши дети, но, конечно, не мы с вами».

Так написали Э. Бергауст и В. Беллер в предисловии к своей книге «Satellite!», изданной в июле 1957 года.

И что…

Спутник вращается вокруг Земли, октябрь 1957 года.

NEW YORK Herald Tribune
European Edition

PARIS, MONDAY, OCTOBER 7, 1957

U.S. Views Satellite as Russian Victory

Fights Flare In Warsaw for Fourth Night

By William J. Humphreys

WARSAW, Oct. 6 — Clashes between riot police and civilians flouted off Thursday by university students battling for the right of free speech, tonight ranged up and down the principal thoroughfares of Warsaw for the fourth consecutive night.

At the same time, Stefan Cardinal Wyszynski, Roman Catholic Primate of Poland, told the tens of thousands of students that while he could understand their "fight," they had to remember "that our country is in a particularly difficult situation."

Those listening to the cardinal's remarks on the occasion of the university's scheduled reopening got the impression that he was warning that hot-headed actions might push Poland into Hungary's position of mid-1956.

Official reports say that a total of 188 have been arrested since the riots started. Several seriously injured persons have been hospitalized. But there has been no official confirmation of any fatality, although there have been mentioned in rumors.

Tonight's main challenge to Polish government authorities was staged in front of Stalin's skyscraping architectural gift to the people of Poland—the Palace of Peace and Culture.

Braves Nip Yanks, 7-5, In Tenth

Series Made 2-2 By 3-Run Rally

By Tommy Holmes

MILWAUKEE, Oct. 6 — Eddie Mathews, of the Braves, teed off in a duel in the tenth inning to win the home run he hit into the right-field bleachers climaxed a three-run rally, beat the pennant Yankees of New York, 7-5, and again evened the 1957 World Series.

Russians Work on New One

It May Get Down With Instruments

By B. J. Cutler

MOSCOW, Oct. 6.—The Soviet Union is working on a new satellite designed to return to earth undamaged and with its instruments intact.

This was disclosed today by Yevgeni Fedorov, scientist in charge of Russia's upper-atmosphere research program, who said Russia was history's first artificial satellite into its orbit around the earth.

The statement came as the nation's newspapers and radio stations erupted in a torrent of applause over Friday's successful launching of the satellite and fired boasts that the Soviet Union had "beaten" the United States and left it far behind in technical progress.

From all major newspapers, it was clear that the Kremlin was trying to convert the scientific achievement into a propaganda victory. Its purpose: to convince the world that such progress was possible only "where the Soviet leadership of the Communist party," as Pravda wrote.

Details Not Revealed

Among the hundreds of thousands of words printed about the satellite, there were almost none about its technical details. No

This photograph, made from an altitude of 143 miles during recent rocket tests in the United States, provides background for artist's conception of the American man-made satellite in flight. Area in the background is of Southwestern United States and northern Mexico.

Cold-War Effect Is Assayed

Symington Calls For Investigation

Editorial—Page 4

By Robert J. Donovan

WASHINGTON, Oct. 6.—The official reaction here yesterday to news of the Soviet earth satellite was that the United States has had the daylight beat out of it in an epic contest of the 20th century.

While the Soviet projectile whirled over this chagrined capital, the portents and consequences of Russia's new conquest of space loomed large and unencouraging. In the view of many observers here, this is what the Soviet triumph means:

1—That the Russians have scored a tremendous propaganda victory in the cold war—a victory likely to strengthen their hand diplomatically, especially in the Middle East.

Program Ahead of U.S.

2—That the Soviet rocket and missile program is far greater and more successful than has been generally known in the United States.

3—That Soviet science is reaching into a period of possibly dazzling achievement.

4—That the Eisenhower administration may be jarred by an explosion of Congressional criticism resulting perhaps in a major Congressional investigation of American military policy. In Kansas City yesterday afternoon Sen. Stuart Symington, D. Mo., called

23-In. Sphere Looping World at 18,000 M.P.H.

Следы на Луне, июль 1969 года.

Перспективы

Нам далеко до создания нанотехнологий, основанных на молекулярном производстве, нас отделяет от них много лет. Может даже показаться, что такие огромные, медлительные гиганты, как мы, никогда не смогут создать такие маленькие, быстрые машины. В следующих главах будет описано, как достижения науки и техники приближают нас к созданию новых технологий. Мы постараемся представить дорогу, по которой нам нужно пройти, оценить ее протяженность и то, как быстро мы движемся. Мы уже на удивление близки к разработке начальной технологии молекулярного производства и с каждой неделей становимся все ближе. Во-первых, грубая технология позволит построить молекулярные машины, которые могут быть использованы для создания лучших молекулярных машин. Мы поднимаемся по лестнице возможностей, которая ведет к производству молекулярных ассемблеров общего назначения, таких же хороших или даже лучше, чем те, которые описаны здесь.

Наши возможности будут огромны. Но если мы не подготовимся, опасность тоже будет огромной. Изменения будут кардинальными независимо от того, готовы мы к ним или нет, но если не готовиться, они окажутся разрушительными, уничтожат привычную промышленность, перевернут военные стратегии и изменят наш образ жизни.

Глава 4
Пути, основоположники и прогресс

О нанотехнологиях обычно спрашивают: «Когда они заработают»? Ответ прост: никто не знает. Как поведут себя молекулярные машины — рассчитать можно, а вот сколько времени уйдет на их разработку — это отдельный вопрос. Законы природы не позволяют составлять расписание для технологических революций, о сроках их наступления можно только догадываться. В этой главе мы рассмотрим различные пути развития нанотехнологий, выслушаем мнение некоторых основоположников и опишем уже достигнутый прогресс. Это не ответит на наш основной вопрос, но позволит высказать некоторые предположения.

Существует несколько принципиально отличающихся способов разработки молекулярной нанотехнологий. Каждый из них, в свою очередь, предполагает несколько альтернативных способов реализации. Интерес исследователей понятен: «Как мы сможем достичь максимально быстрого прогресса»? Чтобы понять ответы, к которым они могут прийти, нам нужно задать тот же вопрос здесь, сосредоточившись на том, с каким позиций мы начинаем (на данный момент) и как делаем свою работу. Мы пересказываем некоторые ответы исследователей своими словами.

Будет ли это когда-нибудь достигнуто?

Начнем с вопроса: «Когда это будет достигнуто»? Ответ на него не может быть получен с помощью расчетов. Однако ответ кажется довольно ясным. На протяжении всей истории люди работали над тем, чтобы добиться лучшего контроля над веществом, вытались заставить атомы делать то, что мы хотим. Это началось, как только люди узнали, что атомы существуют, и с тех пор это желание только усилилось. Хотя различные отрасли промышленности используют разные методы, материалы и инструменты, основная цель была всегда одна и та же. Люди стремятся сделать вещи лучше и сделать их более долговечными, а это означает лучший контроль над структурой вещества. С этой точки зрения нанотехнологии — это всего лишь следующий, естественный шаг в развитии производства, которое совершенствуется на протяжении тысячелетий.

Рассмотрим компакт-диски, которые теперь заменяют привычные стереозаписи: как старые, так и новые технологии штампуют образцы из пластика, но для компакт-дисков выпуклости на поверхности штамповки составляют всего около 130 на 600 нанометров по сравнению с ширины канавки в 100 000 нанометров или около того для записи старого стиля. Или посмотрите на персональный компьютер. Джон Фостер, физик из Исследовательского центра IBM в Альмадене, рассказывает о жестком диске: «Внутри этой коробки есть куча жужжащих дисков, и каждый из них имеет металлический слой, где хранится информация. Поверх металлического слоя нанесен монослой, который является смазкой между диском и головкой, которая перемещается над ним. Его толщина не может быть пятнадцать ангстремов[2], не может быть и три ангстрема. Чтобы устройство работало, толщина монослоя должна быть десять плюс-минус несколько ангстремов. То есть, мы уже имеем дело с технологией, работающей в нанометровом режиме. Мы достигли этого уровня, каждый день пользуемся новой технологией и каждый день зарабатываем с ее помощью».

Транзисторы на компьютерных чипах уменьшаются в размерах по экспоненциальной кривой. Коллега Фостера по IBM Патрик Арнетт ожидает, что так будет и дальше: «Если эта тенденция сохранится, то уже к 2020 году мы практически достигнем атомного масштаба. Такова природа современных технологий. И тенденция будет сохраняться пока это возможно». С этим можно согласиться, и по крайней мере некоторые результаты можно предвидеть, но точный путь и график развития

нанотехнологий непредсказуем. Нет точных ответов на самые важные вопросы: «Как будет развиваться эта технология? Кто ее сделает? Где она будет использоваться? Когда это произойдет? Через десять лет? Пятьдесят? Сто? Это произойдет при моей жизни?» Все будет определяться тем, как люди воспользуются своим временем и ресурсами, которые, в свою очередь, будут зависеть от того, какие цели они посчитают наиболее перспективными. Именно то, как люди будут относиться к новым технологиям, как поймут их возможности, будет иметь большое значение для их развития.

Какие решения больше всего влияют на скорость продвижения?

Решения о возможных направлениях исследований являются определяющими. Исследователи уже сейчас занимаются химическим синтезом, молекулярной инженерией и смежными областями. Если бы хотя бы часть их усилий использовалась разумнее, то это могло бы привести к впечатляющим результатам в развитии молекулярной нанотехнологии. Спонсоры исследований известны — это руководители корпораций и лица, принимающие решения в научных финансовых учреждениях, таких как Национальный научный фонд в Соединенных Штатах и Министерство международной торговли и промышленности Японии. Кроме того, большое влияние на выбор исследований оказывают ученые, непосредственно работающие в лабораториях. Они предлагают потенциальным спонсорам перспективные темы для исследований (и часто занимаются выбранными проектами самостоятельно, не получая финансирования), поэтому их мнения также влияют на выбор стратегии. Там, где речь идет о государственных деньгах, решения политиков могут зависеть от общественного мнения, а общественное мнение зависит от того, что все мы думаем и говорим.

И все же, именно мнение ученых играет центральную роль. Они склонны заниматься тем, что считают интересным. На их выбор влияет то, считают ли они возможным достичь успеха, есть ли в их распоряжении необходимые инструменты или — если речь идет о самых продвинутых исследователях — знают ли они, какие инструменты им нужно изготовить. Инструменты, которыми мы располагаем, в конце концов, формируют наши представления: как говорится, когда у вас есть только молоток, все вокруг выглядит как гвоздь. Новые инструменты помогают возникновению новых идей и дают возможность для дальнейшего развития, а решения о разработке инструментов будут ускорять прогресс в области нанотехнологий. Чтобы лучше понять стоящие перед нами задачи, разумно обратить внимание на то, какие инструменты могут нам понадобиться.

Почему инструменты так важны?

До сих пор ограниченные возможности инструментов сдерживали развитие промышленности. Цепные приводы и шарикоподшипники шестнадцатого века Леонардо да Винчи были теоретически работоспособны, но при жизни изобретателя никогда не использовались. Механический компьютер Чарльза Бэббиджа девятнадцатого века постигла та же участь. В чем проблема? Оба изобретателя нуждались в точно обработанных деталях, которые (это сегодня они легко доступны) не могли быть изготовлены в те времена. Физик Дэвид Миллер рассказывает, как сложный проект разработки интегральных схем в TRW застопорился в начале 1980-х годов по той же причине: «Все сводилось к одному вопросу, может ли немецкая компания охлаждать свои стеклянные линзы достаточно медленно, чтобы обеспечить необходимую нам точность. Они не могли».

В молекулярном мире развитие инструментов снова обеспечивает прогресс, и новые инструменты могут привести к захватывающим дух достижениям. Марк Пирсон, директор отдела молекулярной биологии компании «Du Pont», знает об этом из личного опыта: «Когда я был аспирантом в 1950-х годах, перед нами стояла многолетняя задача определения молекулярной структуры очередного вида белка. Мы говорили: «Один белок — одна карьера». Но сейчас время сократилось, теперь на эту работу уходит не вся жизнь, а только десять лет, а если повезет, то всего нескольких месяцев». В наше время белковые структуры можно изучать атом за атомом, получая рентгеновские отражения от слоев в кристаллах белка. Пирсон замечает, что «получение структуры белка занимала всю жизнь исследователя, отчасти потому, что было трудно получить кристаллы, да и просто получение нужного материала было затруднительно. С новыми технологиями мы можем получить материал в любой момент — это может показаться не очень важным, но на самом деле это большой прогресс. Для людей, занимающихся белками, это имеет огромное значение». Действительно, усовершенствованные инструменты для создания и изучения белков имеют особое значение, поскольку белки являются перспективными строительными блоками для молекулярных машин первого поколения.

Но разве наука занимается не только открытиями, но и инструментами?

Конечно, Нобелевские премии чаще присуждаются за открытия, а не за инструменты и методы, которые сделали их возможными. Если цель премии состоит в том, чтобы стимулировать научный прогресс, это позор. Эта модель вознаграждения распространяется на всю науку, что приводит к хроническому недоинвестированию разработки новых инструментов. Филип Абельсон, редактор журнала «Science», отмечает, что Соединенные Штаты страдают от «отсутствия поддержки разработки новых приборов. В свое время у нас была фактическая монополия на новаторские достижения в области приборостроения. Сейчас на эти цели университетам практически не выделяются федеральные средства». Проще и менее рискованно выжать еще один кусок данных из существующего инструмента, чем инициировать разработку нового, к тому же это требует меньших интеллектуальных усилий.

Но новые инструменты появляются в любом случае, часто их заимствуют из других научных направлений. При изучении кристаллов белка, например, могут быть полезны новые источники рентгеновского излучения, разработанные физиками, а методы химии могут помочь создавать новые белки. Поскольку ученые и инженеры не могут предвидеть появления инструментов в результате инноваций в других исследованиях, они часто слишком пессимистичны в отношении того, что может быть достигнуто в их собственных областях. Нанотехнологии объединят несколько научных исследований, что приведет к созданию инструментов, полезных во многих других. Следует ожидать удивительных результатов.

Какие инструменты используют исследователи для создания небольших устройств?

Современные инструменты для изготовления мелкомасштабных структур бывают двух видов: инструменты молекулярной обработки и инструменты объемной обработки. На протяжении десятилетий химики и молекулярные биологи использовали все лучшие и лучшие инструменты молекулярной обработки для создания и управления точными молекулярными структурами. Эти инструменты созданы для специальных задач. Физики, как мы увидим, недавно разработали инструменты, которые также могут манипулировать молекулами. В сочетании с методами из химии и молекулярной биологии, эти инструменты способны достичь многого.

Микротехнологи применили методы изготовления чипов для изготовления микроскопических машин. Эти технологии — основной подход к миниатюризации в последние десятилетия — могут сыграть всего лишь вспомогательную роль в развитии нанотехнологий. Несмотря на кажущуюся разумность такого подхода, представляется, что микротехнологию нельзя превратить в нанотехнологию.

Но разве нанотехнологии — это не просто очень маленькие микротехнологии?

В течение многих лет было принято считать, что дорога к очень маленьким устройствам ведет через создание все меньших и меньших устройств: путь сверху вниз. На этом пути прогресс измеряется миниатюризацией: насколько мал транзистор, который мы можем построить? Как создать маленький моторчик? Насколько тонкую линию мы можем провести на поверхности кристалла? Миниатюризация фокусируется на масштабе и хорошо окупается, порождая целые отрасли промышленности, начиная от часового дела до микроэлектроники.

Исследователи из AT&T Bell Labs, Калифорнийского университета в Беркли и других лабораторий в Соединенных Штатах использовали микромеханику (основанную на микроэлектронных технологиях) для изготовления крошечных шестерен и даже электродвигателей. Микрообработка также успешно ведется в Японии и Германии. Однако эти микромеханизмы и микромоторы огромны по нанотехнологическим стандартам: типичное устройство измеряется десятками микрометров, что в миллиарды раз превышает объем аналогичных наномеханизмов и наномоторов. (В нашем моделируемом молекулярном мире десять микрон — это размер небольшого города). Помня о разнице в размерах, путать микротехнологию с молекулярной нанотехнологией — это все равно, что путать слона с божьей коровкой.

Однако различия гораздо глубже. Микротехнология сбрасывает атомы на поверхность и собирает их снова в кучу, не обращая внимания на то, как эти атомы используются. Ее методы по сути своей грубые. Молекулярная нанотехнология, напротив, рассматривает каждый атом в отдельности. Как говорит Билл Дегредо, химик, специалист по белкам из «Du Pont»: «Как появились нанотехнологии? Люди работали годами, делая вещи все меньше и меньше, пока не приблизились к молекулярным размерам. Оказалось, что теперь можно уменьшать размер вещей, только если начать строить их из молекул и потом собирать нужным образом». Разница принципиальна: в микротехнологии задача состоит в том, чтобы строить вещи все меньшего размера; в нанотехнологии, наоборот, задача состоит в том, чтобы собирать из исходных деталей большие вещи — мы уже умеем создавать небольшие молекулы.

О неточности терминологии: в последние годы

нанотехнология действительно использовалась для обозначения «очень маленькой микротехнологии». На вопрос: «Почему?», получаем ответ: «По определению». Однако такое использование нового слова для простого расширения старой технологии приведет к значительной путанице, особенно, если учитывать широкое использование приставки «нано» для различных производств. Нанолитография, наноэлектроника, нанокомпозиты, нанопроизводство: не все, что объявляется нано, имеет отношение к молекулярным технологиям или важны для проблем, поднятых в этой книге. Термины молекулярная нанотехнология и молекулярное производство слишком громоздки, но помогают избежать путаницы.

Приведет ли микротехнология к нанотехнологиям?

Можно ли использовать бульдозеры для изготовления наручных часов? Самое большее, они могут помочь построить заводы, на которых будут производиться часы. Хотя могут быть сюрпризы, это хорошая аналогия того, как соотносятся микротехнологии и молекулярные нанотехнологии. Становится понятно, что для достижения инженерных целей на молекулярном уровне необходим подход «снизу вверх».

Каковы основные инструменты, используемые для молекулярной инженерии?

По определению путь к молекулярной нанотехнологии должен лежать через молекулярную инженерию. Работая в разных дисциплинах, руководствуясь разными целями, исследователи добиваются прогресса в этой области. Химики разрабатывают методы, способные построить точные молекулярные структуры, никогда прежде не наблюдаемые. Биохимики учатся строить структуры знакомых видов, таких как белки, чтобы создавать новые молекулярные объекты.

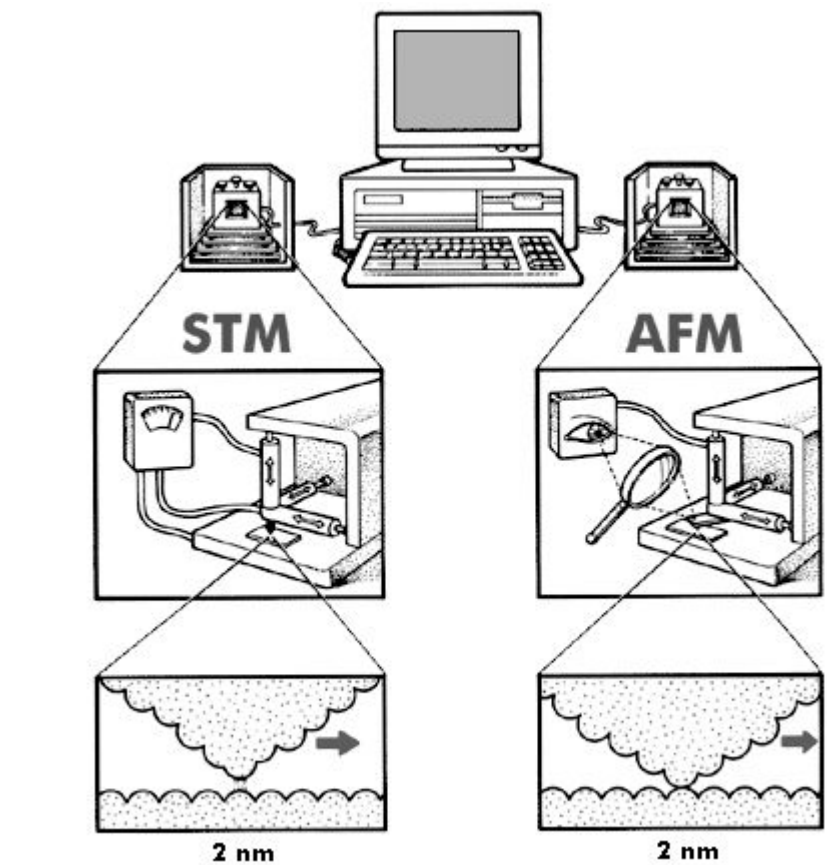
Впрочем, большинство инструментов, используемых химиками и биохимиками, не слишком впечатляющи. Они работают за лабораторными столами, заваленными лабораторной посудой, бутылями, трубками и тому подобным, смешивая, перемешивая, нагревая и разливая жидкости — в биохимии жидкость обычно представляет собой воду со следами растворенного в ней материала. Периодически немного жидкости помещается в большую машину, после чего остается полоска бумаги с напечатанной на ней диаграммой. Как можно догадаться из этого описания, исследования в молекулярных науках обычно намного дешевле, чем исследования в физике высоких энергий (с ее многомиллиардными ускорителями частиц) или исследования в космосе (с ее многомиллиардными космическими аппаратами). Химию называют «малой наукой», не только из-за размера молекул.

Химики и биохимики развивают свою область главным образом путем получения новых молекул, которые могут служить инструментами, помогая строить или изучать другие молекулы. Дальнейшие успехи возможны после появления новых приборов, новых способов изучения молекул и определения их структуры и поведения. Еще больше достижений следует ожидать от применения новых программных инструментов, новых компьютерных методов для прогнозирования поведения молекулы с определенной структурой. Многие из этих программных инструментов позволяют исследователям заглядывать с помощью монитора в моделируемые молекулярные миры, очень похожие на те, которые были представлены в последних двух главах.

Из этих областей именно биомолекулярная наука наиболее активно развивает инструменты, которые могут построить

нанотехнологию, потому что биомолекулы уже формируют молекулярные машины, включая устройства, напоминающие грубые ассемблеры. Этот путь легче всего представить и, безусловно, он может привести к успеху, но нет никакой гарантии, что он будет самым быстрым: научные группы, занимающиеся другими дисциплинами, вполне могут опередить их. Исследования проводятся во всем мире, и прогресс не за горами.

Физики недавно представили новые перспективные инструменты для молекулярной инженерии. Это проксимальные зонды, в том числе сканирующий туннельный микроскоп (СТМ) и атомно-силовой микроскоп (АСМ). Проксимально-зондовое устройство помещает острый наконечник в непосредственной близости от поверхности и использует его для зондирования (а иногда и модификации) поверхности и любых молекул, которые могут быть к ней прикреплены.



Сканирующий туннельный микроскоп (СТМ, слева)

предназначен для измерения рельефа проводящих поверхностей с высоким пространственным разрешением, позволяющим наблюдать отдельные атомы, анализируя скачки тока в зазоре между наконечником и поверхностью. Атомно-силовой микроскоп (АСМ, справа) воспринимает контуры поверхности механическим контактом и оптически: луч лазера направляется на внешнюю поверхность, отражается и попадает на фотодетектор.

Как работает СТМ?

СТМ подводит острую электропроводящую иглу к электропроводящей поверхности, почти касаясь ее. Игла и поверхность электрически соединены (см. левую сторону рисунка 4), так что ток будет течь, если они касаются, например, закрывая переключатель. Но в какой момент мягкие, нечеткие атомы «соприкасаются»? Оказывается, что ток обнаруживается, когда контактируют всего два атома — нечеткие полосы едва перекрываются — один на поверхности и один на кончике иглы. Осторожно перемещая иглу возле поверхности и сохраняя ток, протекающий с крошечной постоянной скоростью, STM может отображать форму поверхности с большой точностью. Естественно, что для того, чтобы поддерживать постоянный ток, игла должна подниматься и опускаться, проходя над отдельными атомами.

СТМ был изобретен Гердом Биннигом и Генрихом Рорером, физиками-исследователями, изучающими поверхностные явления в исследовательских лабораториях IBM в Цюрихе, Швейцария. Заявку на патент они подали в середине 1979 года на основании результатов своей работы в 70-х годов. В 1982 году они получили изображения поверхности кремния, показывающие отдельные атомы. Надо отметить, что важность их работы была признана не сразу: первая научная статья Рорера и Биннига о новом инструменте была отклонена для публикации на том основании, что она «недостаточно интересна». В настоящее время конференции, где обсуждается СТМ, привлекают сотни заинтересованных исследователей со всего мира.

В 1986 году — значительно быстрее, чем это обычно происходит — Бинниг и Рорер были удостоены Нобелевской премии. Шведская академия так объяснила свой выбор: «сканирующий туннельный микроскоп является совершенно новым изобретением, и мы знакомы пока еще только с началом его использования. Однако ясно, что СТМ открывает совершенно уникальные возможности для изучения вещества». СТМ больше не является экзотикой: Компания «Digital Instruments» из Санта-Барбары, Калифорния, продает свою систему (Наноскоп) по почте, гарантируя атомное разрешение или возврат денег. В течение трех лет после их коммерческого внедрения были приобретены сотни СТМ.

Как работает АСМ?

Связанный с ним атомно-силовой микроскоп (справа на Рис. 4) еще проще по своей концепции: иголка зонда мягко прижимается к исследуемой поверхности пружиной и перемещается по ней. Инструмент воспринимает движения пружины (обычно оптически), которая движется вверх и вниз всякий раз, когда наконечник попадает на атом на поверхности. Кончик «чувствует» поверхность так же, как кончик пальца в моделируемом молекулярном мире. АСМ был изобретен Биннигом, Куэйтом и Гербером в Стэнфордском университете и IBM San Jose в 1985 году. Важность АСМ была немедленно признана после успеха СТМ. Среди других преимуществ следует отметить, что он работает с непроводящими материалами. В следующей главе будет описано, как устройства на основе АСМ могут быть использованы в качестве молекулярных манипуляторов при разработке молекулярных нанотехнологий. Сообщается, что АСМ уже стали коммерчески доступными.

Обратите внимание, что АСМ и СТМ не так просты в использовании, как может показаться по описаниям. Например, плохой наконечник или шероховатая поверхность могут помешать разрешению атомов, и еще — не рекомендуется стучать по столу, когда работают такие чувствительные инструменты. Кроме того, ученые часто испытывают трудности с отождествлением того, что они наблюдают, даже когда получают хорошее изображение.

Могут ли проксимальные зонды перемещать атомы?

Для тех, кто привык думать в терминах нанотехнологий, СТМ сразу же выглядела многообещающей не только для наблюдения за атомами и молекулами, но и для манипулирования ими. Эта идея вскоре получила широкое распространение среди физиков. Как заявил Кэлвин Куэйт в «Physics Today» (1986): «Некоторые из нас считают, что сканирующий туннельный микроскоп будет совершенствоваться… что однажды [он] будет использоваться для записи и чтения моделей молекулярного размера». Этот подход был предложен как путь к молекулярной нанотехнологии в «Машинах создания» (1986).

К настоящему времени появились многочисленные научные публикации, посвященные использованию наконечников STM и AFM для царапания, плавления, эрозии, вдавливания и другого изменения поверхностей в нанометровом масштабе. Эти операции действительно перемещают атомы, но недостаточно их контролируют. Они совершают массовые операции в крошечном масштабе — одна тонкая царапина шириной в несколько десятков атомов вместо миллиардов, которые возникают в результате обычных операций полировки.

Могут ли проксимальные зонды более точно перемещать атомы?

В 1987 году Р. С. Беккер, Я. А. Головченко, Б. С. Шварцентрюбер из «AT&T Bell Laboratories» объявили, что использовали СТМ для доставки небольших капель на поверхность из германия. Считалось, что каждая капля состоит из одного или нескольких атомов германия. Вскоре после этого исследователи IBM Альмаден Джон Фостер, Джейн Фроммер и Патрик Арнетт достигли важного результата в перемещении молекул на основе СТМ. Из этой команды Фостер и Арнетт приняли участие в первой Форсайт-конференции по нанотехнологиям, где рассказали нам о подробностях своей работы.

Фостер пришел в IBM из Стэнфордского университета, где он получил докторскую степень по физике и преподавал в аспирантуре. Работа с СТМ стала одним из его первых проектов в корпоративном мире. Он называет своего коллегу Арнетта бывшим «полупроводниковым жакеем», который был участником в создании чипов в лабораториях IBM в Берлингтоне и Йорктауне. Помимо своей докторской степени в области физики, Арнетт обладал опытом инженерной работы.

Арнетт объясняет, что они пытались сделать: «Мы хотели посмотреть, можно ли сделать что-то в атомарном масштабе, чтобы создать механизм для хранения информации и надежного ее использования». Ответ был утвердительным. В январе 1988 года журнал «Nature» опубликовал заметку, в котором сообщал об успехе прикрепления органической молекулы к определенному месту на поверхности, используя СТМ для образования химической связи путем подачи электрического импульса через наконечник. Оказалось, что, создав и разместив однажды молекулу, можно будет вернуться и использовать другой импульс напряжения от наконечника, чтобы изменить свойства молекулы: увеличить ее, частично стереть или полностью удалить.

В IBM быстро разобралась с возможностью коммерческого использования, как объяснил Пол М. Хорн, исполняющий обязанности директора по физическим наукам в «Thomas J. Watson Research Center»: «Это означает, что вы можете создать элемент хранения информации размером с атом. В конечном счете, это может привести к хранению информации в десять миллионов раз более плотное, чем все, что мы имеем сегодня». Более широкое видение было дано другим исследователем

Джоном Петика в журнале «Nature»: «Частичное стирание, о котором сообщает «Foster et al.» подразумевает, что часть молекул может быть преднамеренно удалена, а атомы их «отредактированы», тем самым демонстрируя один из идеалов нанотехнологии».

Могут ли проксимальные зонды перемещать атомы с достаточной точностью?

Группе Фостера удалось прикрепить отдельные молекулы к поверхности, но они не могли полностью контролировать результаты — их положение и ориентацию. Но уже в апреле 1990 года другая группа из той же лаборатории провела манипуляции с атомами еще более впечатляющие, что сделало их известными. С помощью СТМ им удалось получить надпись «IBM», выложенную тридцатью пятью точно расположенными атомами (Рис. 5). Точность молекулярной сборки достигнута полная: каждый атом сидит в углублении на поверхности кристалла никеля; он может оказаться либо в одном углублении, либо в другом, но никогда где-то между ними.

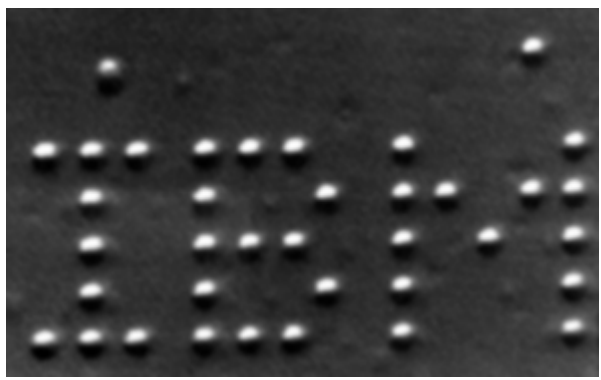


Рисунок 5. САМЫЙ МАЛЕНЬКИЙ ЛОГОТИП В МИРЕ — 35 АТОМОВ КСЕНОНА (предоставлено исследовательским отделом IBM)

Дональд Эйглер, ведущий автор журнала «Nature», в статье посвященной этой работе, ясно видит перспективу: «На протяжении десятилетий электронная промышленность стремилась строить все меньшие и меньшие структуры. Для тех из нас, кто теперь будет использовать отдельные атомы в качестве строительных блоков, задача будет другой: перемещая атом за атомом, создавать новые структуры».

Каковы возможности проксимальных зондов?

Проксимальные зонды как инструмент для развития нанотехнологий, имеют как преимущества, так и слабые стороны. Сегодня их рабочие наконечники, грубо сделанные и неоднородные, как правило, даже грубее, чем показано на рисунке 4. Чтобы сформировать устойчивые связи, группа Джона Фостера использовала электрические импульсы, но результаты было трудно контролировать. Надпись «IBM», выполненная группой Дональда Эйглера, была сделана точно, но оставалась стабильной только при температурах, близких к абсолютному нулю — при комнатной температуре такие модели рассыпаются, потому что они не основаны на стабильных химических связях. Задача собрать конструкции, которые были бы одновременно стабильными и точными, по-прежнему не решена. Формирование стабильных связей в системах, собранных по точным шаблонам — следующая большая задача.

Джон Фостер говорит: «Мы занимаемся концепцией, которую называем «молекулярным стадом», используя СТМ для «стада» молекул, как я использую свою шетландскую овчарку для того, чтобы пасти овец… Наша конечная цель состоит в том, чтобы заставить одну конкретную молекулу из молекулярного стада двигаться к другой, выбранной, а затем заставить их слиться. Если бы вы могли поместить на поверхность две молекулы, которые должны стать частями наномашины, то такое воздействие на «стадо» позволило бы соединить их. Вместо того, чтобы ожидать, что нужный вам результат соединения двух молекул будет достигнут в результате случайного движения жидкости или химических реакций (как это происходит в химических и биохимических опытах), вы должны научиться управлять процессом непосредственно с помощью СТМ. И тогда вы сможете использовать СТМ, чтобы поместить молекулы туда, куда захотите». В следующей главе мы обсудим дополнительные идеи по использованию проксимальных зондов в ранних нанотехнологиях.

Проксимально-зондовые инструменты могут оказать большую помощь в создании первого поколения наномашин, но их использование принципиально ограничено: каждый инструмент огромен по сравнению с молекулами, и возможно только единичное соединение молекул. Чтобы собрать что-то большое — скажем, настолько большое, чтобы это можно было увидеть

невооруженным глазом, — потребовалось бы абсурдно много времени. Устройство такого рода может добавлять в нужное место молекулу за секунду, но даже булавочная головка содержит больше атомов, чем количество секунд с момента образования Земли. Даже создание карманной библиотеки в этом случае стало бы долгосрочным проектом.

Как такие медленные системы могут построить что-то большое?

Кролики и одуванчики содержат структуры, собранные вместе из отдельных молекул, но они быстро растут и размножаются. Как? Они строят параллельно, многие миллиарды молекулярных машин в них работают одновременно. Чтобы получить преимущества такого огромного параллелизма, исследователи могут либо использовать проксимальные зонды для создания лучшей технологии следующего поколения, либо с самого начала использовать другой подход.

Методы химии и биомолекулярной инженерии уже сейчас используют параллельные методы и строят точные молекулярные структуры. Их методы, однако, отличаются от пока еще гипотетических проксимальных зондовых способов управления молекулами. Они используют молекулярные строительные блоки, сформированные для приспособления самопроизвольно, в процессе самосборки.

Дэвид Бигельсен, физик, работающий с СТМами в Исследовательском центре «Xerox Palo Alto», на конференции по нанотехнологиям заявил следующее: «Очевидно, что сборка с использованием СТМ и других вариантов должна изучаться. Но доказательством того, что сборка и самосборка могут быть осуществлены, являются биологические системы. Я не понимаю, почему нужно пытаться заменить то, что уже существует».

Каковы основные преимущества молекулярных строительных блоков?

Огромная технологическая база для молекулярного строительства уже существует. Инструменты, первоначально разработанные биохимиками и биотехнологами для работы с молекулярными машинами, обнаруженными в природе, могут быть перенаправлены на создание новых молекулярных машин. Опыт, накопленный химиками за более чем столетнюю историю устойчивого развития, будет иметь решающее значение в молекулярном проектировании и строительстве. Обе дисциплины обычно обрабатывают молекулы миллиардами и заставляют их формировать шаблоны путем самосборки. Биохимики, в частности, могут начать с копирования природных объектов.

Молекулярные стратегии строительных блоков могут работать вместе со стратегиями проксимальных зондов или могут заменить их, перейдя непосредственно к построению большого количества молекулярных машин. В любом случае, белковые молекулы, вероятно, будут играть центральную роль, как и в природе.

Как белковая инженерия может построить молекулярные машины?

Белки могут самостоятельно собираться в рабочие молекулярные машины, объекты, которые выполняют какую-нибудь функцию, например, режут и соединяют другие молекулы или заставляют мышцы сокращаться. Они также соединяются с другими молекулами, образуя огромные сборки, такие как рибосома (размером примерно со стиральную машину, с точки зрения нашего моделирования). Рибосомы — программируемые машины для производства белков — являются самым близким подходом природы к молекулярному ассемблеру. Индустрия генной инженерии в основном занимается перепрограммированием природных наномашин, рибосом, чтобы производить новые белки или сделать знакомые белки более дешевыми. Проектирование новых белков называется белковой инженерией. Поскольку биомолекулы уже образуют такие сложные устройства, легко видеть, что передовая белковая инженерия может быть использована для создания наномашин первого поколения.

Если мы можем делать белки, почему мы не строим оригинальные молекулярные машины?

Создание белков проще, чем их проектирование. Химики начали с изучения белков, обнаруженных в природе, и только недавно перешли к проблеме разработки новых. Они называются de novo белки, то есть совершенно новые, сделанные с нуля. Проектирование белков трудно из-за того, как они построены. Как объясняет Билл Деградо, химик, занимающийся белками в компании «Du Pont»: «Характерной чертой белков является то, что их активность зависит от их трехмерных структур. Эти действия могут варьироваться от гормонального действия до функции пищеварения или метаболизма. Независимо от их функции, они имеют определенную трехмерную структуру». Эта трехмерная структура образуется, когда цепь собирается, формируя компактный молекулярный объект. Чтобы понять, насколько сложно предсказать естественное сворачивание белковой цепи, представьте себе прямой кусок шнура с сотнями магнитов и липкими узлами по его длине. В этом случае легко свернуть белок и легко понять, как это происходит. Теперь возьмите тот же самый шнур, положите в стеклянную банку и долго встряхивайте. Можете ли вы предсказать его окончательную форму? Конечно, нет: это запутанный беспорядок. Можно было бы назвать эту попытку предсказания «проблемой свертывания липкого шнура»; химики называют ее «проблемой свертывания белка».

При определенных условиях белковая цепь всегда складывается в одну конкретную форму, но эту форму трудно предсказать, исходя из ее выпрямленной структуры. Однако разработчики белков сталкиваются с другой задачей: сначала определить желаемую конечную структуру, а затем выяснить, какую линейную последовательность аминокислот следует использовать для ее создания. Не решая классической проблемы свертывания белка, они занялись конструированием белка.

Что было уже достигнуто?

Билл Дегредо и его коллеги из «Du Pont» добились одного из первых успехов: «Мы смогли использовать основные принципы для проектирования и создания простой молекулы, которая свертывается так, как мы этого хотим. Это действительно первый реальный пример разработанной с нуля структуры белка, а не изменения уже существующей структуры, путем ее модификации».

Хотя ученые занимаются исследованиями, но они, конечно, являются формой инженерии. На их рабочих журналах написано: белковая инженерия. Билл Деградо так объясняет этот процесс: «После того, как вы сделали белок, следующий шаг — выяснить, обладает ли ваш белок нужными вам свойствами. Он сложился? Пропускает ли он ионы через биослои (такие как клеточные мембраны)? Выполняет ли каталитическую функцию (ускорение конкретных химических реакций)? Это можно установить с помощью соответствующего эксперимента. Скорее всего, новый продукт не соответствуют вашим требованиям, поэтому вам нужно выяснить, почему. Но современный хороший проект включает и план действий на случай неудачи и помогает учиться на ошибках. Вместо того чтобы разрабатывать структуру, анализ которой занял бы год или более, вы проектируете ее так, чтобы ее структура и конкретная функция могли быть проанализированы в течение нескольких дней».

Сегодня многие группы занимаются разработкой белков, в том числе такие академические исследователи как Джейн и Дэйв Ричардсон из Университета Дьюка, Брюс Эриксон из Университета Северной Каролины, а также Том Бланделл, Робин Литбарроу и Алан Фершт в Великобритании. И успехи пришли. Япония, однако, выделяется тем, что имеет организацию, которая занимается исключительно подобными проектами: Научно-исследовательский институт белковой инженерии (PERI) в Осаке. В 1990 году PERI объявила об успешном проектировании и строительстве белка de novo в несколько раз большего по размеру, чем любой построенный ранее.

Есть ли что-то особенное в белках?

Главное преимущество белков в том, что о них очень многое известно, и существует достаточно инструментов для работы с ними. Однако у белков есть и недостатки. Хотя бы потому, что эта проектная работа начинается с мягких белков — а мягкие молекулы мало подходят для нанотехнологий, — но это не означает, что так будет и дальше. Деградо отмечает: «Основная цель нашей работы в «De novo design» — сделать следующий шаг и полностью уйти от белковых систем». Одной из первых попыток стала работа Уоллеса Каротерса из «Du Pont», который применил подход de novo к изучению природы белков: вместо того, чтобы разрезать белки, он попытался создать вещи, используя аминокислоты и другие подобные мономеры. В 1935 году ему удалось сделать нейлон.

Деградо объясняет: «В «Du Pont» существует глубокая философская вера в способность людей производить молекулы de novo, которые будут создавать полезные вещи. И у руководства компании есть достаточная уверенность в том, что, следуя по этому пути, удастся добиться успеха: не напрямую и не всегда предсказуемо, но они и дальше намерены поддерживать фундаментальную науку.

Я думаю, что в конечном итоге у нас есть большие шансы добиться по-настоящему волнующих вещей в разработках с de novo, потому что наши возможности намного больше, чем у природы. Подумайте о способности летать: можно было бы разводить лучших почтовых голубей, а не создавать самолеты». Биологическое сообщество, впрочем, склоняется больше к орнитологии, чем к аэрокосмической технике. Опыт Деградо заключается в том, что «многие биологи считают, что если вы не работаете с реальными биологическими объектами (естественными белками), вы не занимаетесь биологией, поэтому они неохотно пользуются нашими результатами. С другой стороны, они признают, что это хорошая химия».

Каковы пути развития белковой инженерии?

Как и физики IBM, проектировщики белков стремятся развивать молекулярную инженерию. В 1989 году Билл Деградо предсказал: «Я думаю, что, возможно, мы сможем получить катализаторы или ферменты, которые должны стать катализаторами для реакций, не катализируемые в природе». Катализаторы — это молекулярные машины, которые ускоряют химические реакции: они формируют условия для двух реагирующих молекул, их присутствие помогает реакции проходят быстрее, до миллиона реакций в секунду. Новые катализаторы для реакций, которые сейчас идут медленно, обеспечат химической промышленности огромную экономию средств.

Это предсказание подтвердилось уже через несколько месяцев, когда денверские исследователи Джон Стюарт, Карл Хан и Вислав Клис объявили о новом ферменте, разработанном ими с нуля в течение двух лет и успешно получившемся с первой попытки. Этот катализатор заставляет некоторые реакции идти примерно в 100 000 раз быстрее. Нобелевский лауреат по биохимии Брюс Меррифилд считает, что «если другие смогут воспроизвести и расширить эту работу, это будет одним из самых важных достижений в биологии и химии».

У Деградо есть долгосрочные планы по разработке белков помимо создания новых катализаторов: «Это позволит нам думать о разработке молекулярных устройств в ближайшие пять-десять лет. В конечном итоге должна быть возможность спроектировать конкретную конструкцию и построить ее. Тогда у вас будут, скажем, белковые молекулы, которые самоорганизуются в сложные молекулярные объекты, которые могут служить машинами. Но есть предел тому, какими маленькими вы можете сделать устройства. Вы будете уменьшать вещи до тех пор, пока не окажется, что еще меньше их сделать нельзя, потому что вы достигли молекулярных размеров».

Марк Пирсон утверждает, что руководство «Du Pont» поддерживает это стремление. Что касается перспектив развития нанотехнологий и ассемблеров, он заметил: «Понятно, что это наверняка потребует денег, усилий и хороших идей. Но с моей точки зрения, нет никаких абсолютных фундаментальных ограничений, которые бы помешали нам делать такого рода вещи». Он не сказал, что его компания планирует развивать

нанотехнологии, но такие заверения на самом деле и не нужны. «Du Pont» уже находится на пути создания нанотехнологий, по другим — более краткосрочным, коммерческим — причинам. Как и IBM, если они решат успешно развиваться, у них есть ресурсы и перспективные люди, необходимые для успеха.

Кто еще занимается молекулярными объектами?

Химики, большинство из которых не работают над белками, являются традиционными экспертами в построении молекулярных объектов. Выполняя свою работу, они строят молекулы уже более века, их умение и уверенностью постоянно растут. Все их методы косвенные: они работают с миллиардами атомов одновременно — используя массовый параллелизм, — но не контролируя их положение. Молекулы обычно беспорядочно попадают в жидкость или газ, как кусочки головоломки, которые смогут правильно соединяться друг с другом при встряхивании в коробке, или не смогут. При правильном замысле и планировании, большинство частей соединятся, как и требуется.

Химики смешивают молекулы в огромном масштабе (с нашей точки зрения моделирования, пробирка содержит вспенивающийся молекулярный рой с объемом внутреннего моря), но они все же достигают точных молекулярных преобразований. Учитывая, что они работают таким окольным путем, их достижения поражают. Отчасти это является результатом огромного объема работы, проделанной в этой области в течение многих десятилетий. Тысячи химиков работают над молекулярным строительством только в Соединенных Штатах; добавьте к этому химиков в Европе, Японии и в остальном мире, и вы получите огромное сообщество исследователей, добивающихся больших успехов. Даже если печатать только один абзац резюме каждого отчета об исследованиях, рефератов и руководств по химической литературе, публикации займут несколько библиотечных стен, и каждый год полочное пространство библиотеки будет заполняться еще на много футов.

Как смешивание химических веществ может создавать молекулярные объекты?

Инженер сказал бы, что химики (по крайней мере, те, кто специализируется на синтезе) заняты строительными работами, и был бы поражен, что им удается чего-то добиться, несмотря на то, что они не в состоянии захватывать детали и доставлять их на нужное место. Химики, по сути, работают со связанными за спиной руками. Молекулярное производство может быть названо «позиционной химией» или «позиционным синтезом» и даст химикам возможность перемещать молекулы в трехмерном пространстве. Вместо того чтобы пытаться собирать пазлы из деталей, которые будут склеиваться сами по себе, после того, как их встряхивают вместе в коробке, химики смогут оперировать и нужным образом соединять большие как кирпичи молекулы. Основные принципы химии останутся прежними, но стратегии строительства станут гораздо проще.

Не имея возможности контролировать положение, химики сталкиваются примерно с такой проблемой: представьте себе гигантскую стеклянную бочку, полную крошечных сверл на батарейках, вибрирующих и дергающихся во всех направлениях. Ваша цель состоит в том, чтобы взять кусок дерева и просверлить отверстие только в одном определенном месте. Если вы просто бросите его в бочку, он будет бессистемно просверлен во многих местах. Чтобы контролировать процесс, вы должны защитить все места, в которых вам дырки не нужны — возможно, путем приклеивания защитных металлических пластин на большей части поверхности древесины. Эта проблема — как защитить одну часть молекулы, воздействуя на другую, при создании все больших и больших молекул — заставила химиков применять хитроумные уловки.

Если химики могут создавать молекулы, почему они не строят причудливые молекулярные машины?

Химики могут достичь больших результатов, но они сосредоточили большую часть своих усилий на дублировании молекул, обнаруженных в природе и внесении в них незначительных изменений. В качестве примера возьмем палитоксин, молекулу, обнаруженную в Гавайском коралле. Получить его в лаборатории было очень трудно, поэтому его назвали «Эверестом синтетической химии», а его синтез был провозглашен триумфом. Дальнейшие усилия были направлены на создание небольших молекул с необычными связями или молекул с классической симметрией, таких как «кубан» и «додекаэдр» (названых так в честь Платоновых тел).

Химики, по крайней мере, в Соединенных Штатах, считают себя естествоиспытателями, даже когда их научная работа заключается в создании искусственных молекул. Обычно, люди, которые строят вещи, называются инженерами. И действительно, в Токийском университете кафедра синтетической химии входит в состав инженерного факультета; ее химики разрабатывают молекулярные коммутаторы для хранения компьютерных данных. Но инженерные достижения возможны только тогда, когда перед людьми ставятся инженерные цели.

Как химики смогут продвигаться к созданию молекулярных машин?

Молекулярные инженеры, занимающиеся нанотехнологией, нуждаются в наборе молекулярных строительных блоков для создания больших, сложных структур. Систематическое производство таких строительных блоков впервые было начато Брюсом Меррифилдом, лауреатом Нобелевской премии по химии 1984 года. Его подход, известный как «твердофазный синтез» или просто «метод Меррифилда», используется для синтеза длинных цепей аминокислот, образующих белки. В методе Меррифилда каждый цикл химической реакции добавляет один молекулярный строительный блок к концу цепи, закрепленной на твердой основе. Это происходит параллельно в каждой из триллионов одинаковых цепочек, выстраивая триллионы молекулярных объектов с определенной последовательностью строительных блоков. Химики обычно используют метод Меррифилда, чтобы сделать молекулы больше, чем палитоксин. Соответствующие методы используются для создания ДНК в так называемых генных машинах: объявление от компании из Алабамы гласит: «заказанная ДНК — очищенная и доставленная в течение 48 часов».

Несмотря на то, что трудно предсказать, как будет свертываться естественная белковая цепь, — они и не были предназначены для предсказуемого свертывания — химики могли бы получать строительные блоки больших размеров, разнообразнее и более склонных образовывать единую, понятную и стабильную структуру. С набором таких строительных блоков и методом Меррифилда, позволяющим связывать их вместе, молекулярные инженеры могли бы проектировать и создавать молекулярные машины довольно легко.

Как исследователи проектируют то, что они не могут видеть?

Чтобы создать новую молекулу, необходимо разработать как ее структуру, так и процедуру ее получения. По сравнению с гигантскими научными проектами, такими как сверхпроводящий суперколлайдер и космический телескоп Хаббла, работа с молекулами может быть выполнена при ограниченном бюджете. Тем не менее, затраты на попытки проведения многих различных процедур складываются. Чтобы заранее рассчитать, что будет работать, а что нет, проектировщики используют модели.

Вы, возможно, знакомы с моделями молекул по занятиям в классе химии: цветные пластиковые шары и палочки, соединяющие их, как в детском конструкторе. Каждый цвет представляет собой отдельный вид атома: углерод, водород и так далее. Даже простые пластиковые модели могут дать вам представление о том, сколько связей имеет каждый атом, сколько их, и как они расположены в пространстве. Более сложная форма модели использует только шары и полусферы, без палочек. Эти красочные, объемные формы называются CPK-моделями и широко используются профессиональными химиками. Нобелевский лауреат Дональд Крам отмечает, что «мы потратили сотни часов на создание CPK-моделей потенциальных молекулярных систем и оценку их полезности в качестве целей исследований». Его исследования, как и работы коллег, нобелевских лауреатов Чарльза Дж. Педерсена и Жан-Мари Лена, были сосредоточены на разработке и создании молекул среднего размера, которые собираются самостоятельно.

Физические модели не могут хорошо описать, как колеблются и движутся молекулы, а вот компьютерные модели могут. Компьютерное моделирование уже играет ключевую роль в молекулярной инженерии. Как отметил Джон Уокер (основатель и лидер «Autodesk»): «В отличие от всех предшествовавших промышленных революций, молекулярной инженерии требуется в качестве важного компонента способность проектировать, моделировать и модернизировать молекулярные структуры с помощью компьютеров».

Это не осталось незамеченным в бизнес-сообществе. Замечание Джона Уокера было частью доклада о нанотехнологиях, сделанного в «Autodesk», лидере в области автоматизированного проектирования и одной из пяти крупнейших фирм программного обеспечения в Соединенных

Штатах. Вскоре после этого выступления компания сделала свои первые крупные инвестиции в автоматизированное проектирование молекул. [3]

Как молекулярное конструирование выглядит в сравнении с более знакомыми видами инженерных разработок?

Производители и архитекторы знают, что проекты для новых продуктов и зданий лучше всего делать на компьютере с помощью автоматизированного проектирования (САПР). Новое программное обеспечение для молекулярного проектирования можно назвать молекулярным САПРом, и его ведущими разработчиками являются такие исследователи, как Джей Пондер из отдела молекулярной биофизики и биохимии Йельского университета. Он считает, что «существует сильная связь между тем, что делают молекулярные конструкторы и что делают архитекторы. Например, Майкл Уорд из «Du Pont» разрабатывает набор строительных блоков для набора игрушек «Тинкер», чтобы вы могли собирать более крупные структуры. Именно этим мы занимаемся, используя методы молекулярного моделирования».

«Все принципы проектирования и машиностроения, которые применяются при строительстве небоскреба или моста, применимы и к молекулярной архитектуре. Если вы строите мост, то должны сначала исследовать его модель. Посмотреть, сколько грузовиков одновременно может передвигаться по мосту, чтобы он не разрушился, какую нагрузку он выдержит, сможет ли он противостоять землетрясению».

«Точно так же происходит при молекулярном конструировании: вы проектируете части, а затем анализируете нагрузки и силы, которые будут на них действовать, и как они изменят и нарушат структуру. Как и при проектировании, и строительстве здания вы анализируете нагрузки на любую макромасштабную структуру. Я думаю, что важно заставить людей думать в этих терминах».

«Молекулярный конструктор должен быть творческим человеком точно так же, как архитектор должен быть творческим человеком при проектировании здания. Когда молекулярный конструктор смотрит на внутреннюю часть белковой структуры и пытается переделать ее так, чтобы создать пространство, которое должно выполнять определенную функцию, например, связь с определенными молекулами, это похоже на проектирование комнаты для использования в качестве столовой — той, которая будет соответствовать определенным размерам столов и определенному количеству гостей. В обоих случаях вы должны создать пространство для выполнения нужной вам функции».

Пондер сочетает химию и информатику с общим инженерным подходом: «Я своего рода гибрид. Я трачу около половины своего времени на эксперименты, а вторую половину на написание компьютерных программ и выполнение вычислительной работы. В лаборатории я создаю или проектирую молекулы для проверки некоторых вычислительных идей. Так что я занимаюсь и тем, и другим». Инженерная подготовка помогает думать о том, куда могут привести молекулярные исследования: «Хотя с нанотехнологиями мы встречаемся в нанометровом масштабе, структуры все еще достаточно велики, чтобы очень многие эффекты были классическими. С другой стороны, это действительно похоже на строительство мостов — очень маленьких мостов. И поэтому применяются много почти стандартных методов машиностроения для архитектуры и строительных конструкций, таких как анализ напряжений, например».

Разве инженерное конструирование не требует больше командной работы, чем наука?

Переход к нанотехнологиям потребует работы специалистов в разных областях: химиков, которые должны научиться создавать молекулярные машины; компьютерщиков, которые создают программы для проектирования; и, возможно, специалистов для СТМ и АСМ, которые могут предоставить инструменты для молекулярного позиционирования. Однако для достижения прогресса эти эксперты должны не просто работать, они должны работать сообща. Поскольку нанотехнология по своей сути является междисциплинарной дисциплиной, страны, которые жестко разделяют различные академические исследования, как это делают Соединенные Штаты, рано или поздно обнаружат, что их исследователи испытывают трудности в общении и сотрудничестве.

В химии сегодня большой командой считается лаборатория, где работают полдюжины исследователей, которым помогают несколько десятков студентов и техников. В аэрокосмической технике огромные задачи, такие как полет на Луну или строительство нового авиалайнера, разбиваются на части, которые могут быть выполнены небольшими командами. Все эти небольшие подразделения работают совместно, образуя большую команду, состоящую из тысяч инженеров, которым помогают многие тысячи техников. Если химия стремится к созданию системной молекулярной инженерии, химикам нужно будет сделать хотя бы несколько шагов в этом направлении.

Общеизвестно, что проектирование ракеты требует навыков из многих дисциплин. Некоторые инженеры знают общую структуру, другие являются специалистами по насосам, горению, электронике, программному обеспечению, аэродинамике, теории управления и так далее и так далее по длинному списку дисциплин. Руководители проекта знают, как объединить различные умения, чтобы ракета взлетела.

В академической науке междисциплинарная работа продуктивна и похвальна, но относительно редка. Ученым не нужно сотрудничать, чтобы их результаты соответствовали друг другу: все они описывают разные части одного и того же объекта — природы — поэтому в долгосрочной перспективе их результаты, как правило, объединяются в единую картину. Инженерные проекты, однако, отличаются от научных. Поскольку

они более творческие (поскольку создают сложные вещи), то требуют большего внимания к совместной работе. Если готовые детали должны работать совместно, они должны быть разработаны группами, которые знакомы с общим проектом и понимают, какую часть общей работы должна выполнить конкретная деталь. Инженеры различных дисциплин вынуждены общаться; задача управления и координации состоит в том, чтобы сделать это общение возможным. Это будет относиться к инженерным проектам молекулярных систем так же, как и к инженерным проектам производства компьютеров, автомобилей, самолетов или заводов.

Джей Пондер предполагает, что это вопрос будущего. «Все дело в том, что считают важным различные группы, которые должны собраться вместе, чтобы сделать общую работу: химики делают свою часть, а программисты свою. Люди должны собраться вместе и увидеть общую картину. Конечно, есть специалисты, которые видят и пытаются преодолеть возникающие пробелы, но их мало, большинство людей просто выполняют свою работу». Прогресс в создании нанотехнологий будет продолжаться, и, со временем, исследователи, обученные как химики, физики или другие специалисты, научатся разговаривать друг с другом для решения новых проблем. Они либо начнут думать как инженеры и работать в команде, либо их заменят коллеги, которые умеют это делать.

Препятствуют ли эти проблемы прогрессу?

Несмотря на все эти проблемы, неуклонное продвижение к созданию нанотехнологий продолжается. Промышленность должна получить лучший контроль над веществом, чтобы оставаться конкурентоспособной на мировом рынке. СТМ, белковая инженерия и большая часть химии развиваются благодаря коммерческому использованию. Целенаправленные усилия быстрее привели бы к цели, но даже без четкой координации прогресс в этом направлении неизбежен. Как замечает Билл Деградо: «У нас действительно есть необходимые инструменты. Опыт показывает, что когда у вас есть теория и подходящие инструменты, чтобы сделать какие-то вещи, в конце концов, наука делает шаг вперед и создает их — поскольку может это сделать». Джей Пондер соглашается: «В течение следующих нескольких лет вы увидите медленный эволюционный прогресс в работе людей, которые занимаются молекулярными структурами и изучают их свойства. Люди будут работать над конкретной задачей, потому что получили заявку на ее выполнение или грант, финансирующий работу. И в процессе выполнения чего-то вроде улучшения способности стирального порошка очищать белковые пятна «Proctor and Gamble» поможет разработать принципы повышения молекулярной стабильности и проектирования пространств внутри молекул».

Несут ли японцы свою долю бремени в нанотехнологических исследованиях?

По целому ряду причин вклад Японии в нанотехнологические исследования обещает быть внушительным. В то время как Соединенные Штаты продолжают рассматривать это направление как долгосрочный проект, похоже, что Япония начала применять более целенаправленный подход. У исследователей там уже есть четкие представления о молекулярных машинах — о том, что может работать, а что, вероятно, не будет. Японские исследователи привыкли к более высокому уровню междисциплинарного контакта и акцента на инженерные разработки, чем американцы. В Соединенных Штатах мы ценим «фундаментальную науку», часто называя ее «чистой наукой», как бы подразумевая, что практические приложения являются формой нечистоты. Вместо этого Япония делает акцент на «базовых технологиях».

Нанотехнологии — это базовая технология, и японцы признают ее таковой. Недавние изменения в Токийском технологическом институте — японском эквиваленте MIT — отражают их взгляды на перспективные направления будущих исследований. На протяжении многих десятилетий Токийский технологический институт имел два основных подразделения: факультет науки и факультет подготовки инженеров. К ним теперь добавляется факультет бионауки и биотехнологии, состоящий из четырех кафедр: кафедра бионауки, кафедра биоинженерии, кафедра биомолекулярной инженерии и так называемая «кафедра биоструктуры». Создание нового факультета в крупном японском университете — редкое событие. В каком университете США есть кафедра, непосредственно посвященная молекулярной инженерии? Япония имеет как отделы в Токийском технологическом институте, так и недавно созданный факультет молекулярной инженерии Киотского университета.

Японский институт физических и химических исследований (RIKEN) обладает широкой междисциплинарной силой. Хироюки Сасабе, руководитель программы Frontier Materials Research в RIKEN, отмечает, что институт обладает опытом в области органического синтеза, белковой инженерии и технологии СТМ. Сасабе говорит, что его лаборатории может понадобиться молекулярный манипулятор, описанный в следующей главе, чтобы достичь своих целей в молекулярной инженерии.

Исследовательские консорциумы в Японии также движутся в

сторону нанотехнологий. Организация «Исследовательские программы для передовых технологий» (ERATO) параллельно спонсирует многие трех-пятилетние проекты, каждый из которых имеет конкретную цель. Рассмотрим текущую работу:

— Yoshida Nanomechanism Project
— Hotani Molecular Dynamic Assembly Project;
— Kunitake Molecular Architecture Project;
— Nagayama Protein Array Projectt
— Project проект Aono Atomcraft.

Они сосредоточены на различных аспектах получения контроля над веществом на атомном уровне. Проект Nagayama Protein Array направлен на использование белков в качестве инженерных материалов для перехода к созданию новых молекулярных устройств. Проект Aono Atomcraft не включает в себя ядерную энергетику, как это может понять из его названия, но на самом деле представляет собой междисциплинарную попытку использовать СТМ для распределения вещества в атомном масштабе.

В какой-то момент работа над нанотехнологиями должна выйти за рамки ответвлений разработок в других областях и заняться проектированием и строительством молекулярных машин. Переход от приспособляющейся науки к организованной технике требует изменения отношения к этой технологии. В этом Япония опережает США.

Насколько хороша обоснованная догадка о том, сколько времени потребуется для развития молекулярных нанотехнологий?

Молекулярные нанотехнологии будут появляться постепенно. Основные вехи, такие как разработка белков и манипулирование отдельными атомами, уже пройдены. Чтобы получить представление о вероятном темпе развития событий, нам нужно посмотреть, как различные тенденции сочетаются друг с другом.

Компьютерные программы молекулярного моделирования являются порождением инструментов автоматизированного проектирования. Они будут развиваться. Базовая техническая база — компьютерное оборудование — на протяжении десятилетий улучшалась по цене и производительности по резко растущей кривой, что, как ожидается, будет продолжаться в течение многих лет. Эти достижения совершенно не зависят от прогресса в молекулярной инженерии, но они делают молекулярную инженерию проще, ускоряя прогресс ее развития. Компьютерные модели молекулярных машин начинают появляться, и это будет повышать заинтересованность исследователей.

Прогресс в разработке молекулярных машин, будь то с помощью проксимальных зондов или самосборки, в конечном итоге приведет к поразительным успехам; исследования в Японии начнут привлекать серьезное внимание; осознание долгосрочных перспектив молекулярной инженерии получит распространение. Некоторое сочетание этих разработок в конечном итоге приведет к изменению общественной оценки того, чего могут достичь эти технологии — и тогда мир мнений, финансирования и моды на исследования изменится. До сих пор прогресс был устойчивым, но бессистемным; отныне прогресс будет стимулироваться серьезным интересом крупных коммерческих, военных и медицинских исследовательских программ, потому что нанотехнологии будут способствовать достижению основных коммерческих, военных и медицинских целей. Сроки развития во многом зависят от того, когда, наконец, возникнет серьезное внимание.

Думая о том, когда все произойдет, люди склонны предполагать, что большие изменения должны занять много времени. Большинство — да, но не все. Карманные калькуляторы оказали пагубное влияние на судьбу логарифмической линейки: они заменили ее. Скорость, с которой это произошло, застала производителей логарифмических линеек врасплох, но темпы

прогресса в электронике не замедлились только из-за того, что их не ждали.

Можно утверждать, что нанотехнологии будут развиваться быстро: многие страны и компании будут конкурировать, чтобы оказаться первыми. Они будут продвигаться вперед как за счет огромных ожидаемых выгод — во многих областях, включая медицину и защиту окружающей среды, — так и за счет потенциального военного применения. Это мощное сочетание мотивов, а конкуренция — проверенный ускоритель.

Есть, впрочем, и мнение, что развитие будет медленным: любой, кто сделал что-либо значимое в реальном мире технологии — проводя научный эксперимент, написав компьютерную программу, выводя новый продукт на рынок — знает, что достижение цели требуют больше времени, чем ожидалось. Действительно, закон Хофштадтера гласит, что проекты занимают больше времени, чем ожидалось, даже когда закон Хофштадтера принимается во внимание. Этот принцип хорошо работает и для простых краткосрочных проектов.

Однако ситуация меняется, когда в течение ряда лет несколько различных групп исследуют различные подходы. В этом случае большинство проектов действительно могут занять больше времени, чем ожидалось, но поскольку команд и подходов много, один из них может привести к успеху быстрее, чем ожидалось. Победитель гонки всегда быстрее, чем средний бегун. Джон Уокер отмечает: «Замечательное качество молекулярной инженерии заключается в том, что, похоже, есть много разных способов добиться там успеха, и в настоящее время быстрый прогресс происходит по многим путям одновременно».

Кроме того, развитие технологий похоже на гонку, проходящую по не нанесенной на карту местности. Когда первые бегуны достигают вершины холма, они могут увидеть короткий путь. Отставший бегун может врезаться в кусты и наткнуться там на велосипед и мощеную дорогу. Прогресс технологии редко предсказуем, потому что постоянно открывают новые направления.

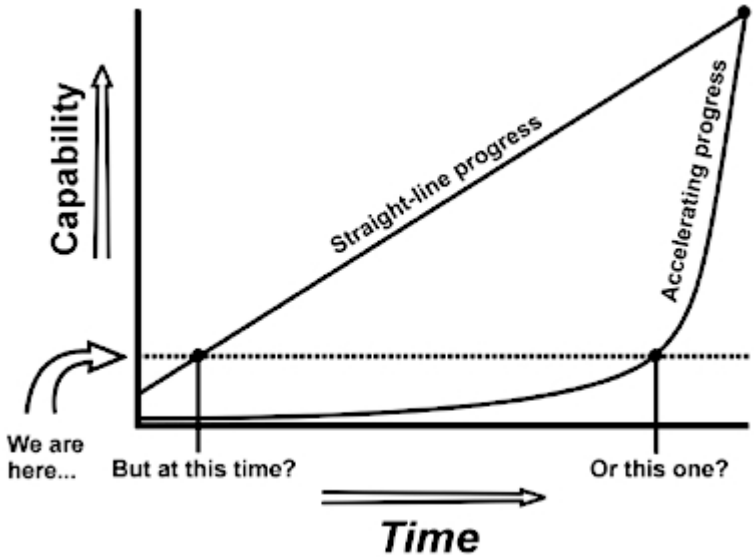


ГРАФИК ЛИНЕЙНОГО И УСКОРЕННОГО РОСТА ТЕХНОЛОГИИ

Насколько мы близки к цели, зависит от того, является ли ускорение технического прогресса постоянным. На этой диаграмме пунктирная линия представляет текущий уровень технологии, а большая точка в правом верхнем углу изображает желанную цель, такую как нанотехнология. Двигаясь прямолинейно легче оценить, насколько далеко находится цель. А если двигаться с ускорением, успех может быть достигнут значительно быстрее.

Итак, как мы можем оценить дату появления нанотехнологий? Разумнее сделать осторожное предсказание: когда вы ожидаете выгоды, предположите, что это произойдет не скоро; когда вы готовитесь к потенциальным проблемам, предположите, что они уже за углом. Старая народная поговорка гласит: надейся на лучшее, готовься к худшему. Любые назначенные даты: «не скоро» и «уже за углом», всего лишь догадки — можно рассчитать поведение молекул, но не расписание технологических достижений. С учетом этих предостережений мы бы предположили, что универсальные молекулярные ассемблеры, вероятно, будут разработаны в первые десятилетия двадцать первого века, возможно, в первом.

Джон Уокер, чье технологическое предвидение привело «Autodesk» от основания до доминирующей роли в своей отрасли, указывает, что не так давно «многие провидцы, близко знакомые с

развитием кремниевой технологии, все еще прогнозируют, что потребуется от двадцати до пятидесяти лет, прежде чем молекулярная инженерия станет реальностью. Это далеко за горизонтом планирования большинства компаний». Но в последнее время все стало меняться. Основываясь на новых событиях, Уокер делает ставку: «Текущий прогресс предполагает, что революция может произойти в течение этого десятилетия, возможно, уже через пять лет».

Глава 5
Порог нанотехнологий

В предыдущей главе мы рассмотрели современный уровень исследований. До внедрения нанотехнологий очень далеко, даже создание карманной библиотеки стало бы большим скачком. Как будет преодолен этот разрыв?

В этой главе мы расскажем, как новые разработки могут привести к нанотехнологиям. Реальный путь создания нанотехнологии — тот, который потом будет описан в исторических книгах — может возникнуть из любого из направлений исследований в физике, биохимии и химии, описанных в предыдущей главе, или (что более вероятно) из их комбинации. Наличие такого количества возможных вариантов вселяет уверенность в то, что цель может быть достигнута, даже если это уменьшает вероятность того, что какой-то конкретный путь окажется самым быстрым. Чтобы увидеть, как прогресс может преодолеть разрыв между современной технологией и зачатками нанотехнологии, давайте проследим один из многих возможных путей.

Преодоление разрыва

Один из способов преодоления этого разрыва — разработка молекулярного манипулятора на основе АСМ, способного выполнять элементарные действия с молекулами. Это устройство будет сочетать простое молекулярное устройство — молекулярный захват — с механизмом позиционирования АСМ. АСМ может точно перемещать свой наконечник; молекулярный манипулятор доставит захват к наконечнику, способному удерживать этот молекулярный инструмент. Молекулярный манипулятор такого рода управлял бы химическими реакциями, перемещая молекулы, как медленный, простой, но огромный ассемблер. (В нашем стандартном представлении моделирования, где рука молекулярного ассемблера помещается в комнате, аппарат АСМ молекулярного манипулятора был бы размером с Луну.) Но несмотря на свои размеры, молекулярный манипулятор АСМ будет поразительным достижением.

Как это может произойти? Поскольку мы выбираем один путь из многих возможных, то можем подробнее рассказать о его создании. (Техническое описание устройства, подобного приведенному ниже, можно найти в «Nature»; см. техническую библиографию).

Сценарий: разработка молекулярного манипулятора

Несколько лет назад исследователи из Университета Бробдингнага занялись разработкой молекулярного манипулятора. Чтобы достичь цели, дюжина физиков, химиков и исследователей белка объединились в команду (некоторые работали полный рабочий день, некоторые неполный) и начали совместную творческую работу, необходимую для решения основных проблем.

Сначала им нужно было прикрепить зажимное устройство к наконечнику АСМ. В качестве зажимного устройства они выбрали фрагменты молекул антител, изирательно липких белков, которые иммунная система использует для связывания и идентификации микробов. Если бы они могли прикрепить «заднюю» часть молекулы к наконечнику, то «передняя» могла бы связывать и удерживать молекулярные инструменты. Преимущество использования фрагментов антител состояло в свободном выборе инструмента. С конца 1980-х годов исследователи смогли создать антитела, способные соединять практически любую заранее выбранную молекулу с молекулярным инструментом. Они испробовали полдюжины методов, прежде чем наши тот, который работал надежно, и обеспечивал результат, как это показано на рисунке 6. Аспирантка получила докторскую степень, а наконечник АСМ получил свой захват.

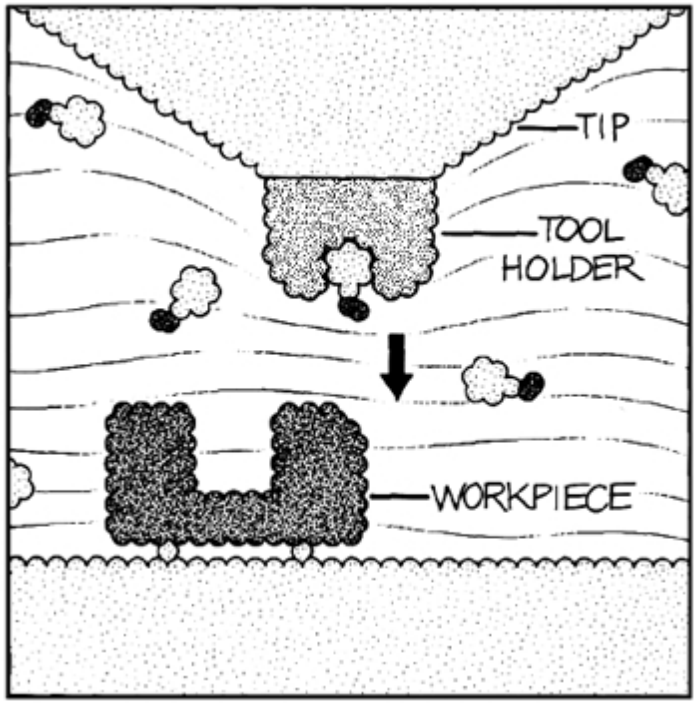


Рисунок 6. МОЛЕКУЛЯРНЫЙ МАНИПУЛЯТОР

Молекулярный манипулятор (наконечник АСМ и зажимное устройство инструмента, выше) будет связывать и перемещать химически активные молекулярные инструменты для создания заготовки, молекула за молекулой. Параллельно исследователи «U. Brob AFM» работали над размещением наконечников в нужном месте, а затем удерживали их там с атомной точностью в течение нескольких секунд. Это оказалось просто. Они использовали методы, разработанные другими исследователями в начале 1990-х годов, несколько усовершенствовав их.

Теперь у них было зажимное устройство, и возможность перемещать его в нужное место, но им нужен был набор инструментов. Зажимное устройство было похоже на патрон дрели перед тем, когда в его гнездо вставят нужный инструмент. В конце концов, химики из команды синтезировали дюжину различных молекулярных инструментов, все они были одинаковы с одного конца, но разные с другого. Соответствующие части были прикреплены к такому же зажимному устройству антитела, аккуратно сохраняя его положение. Свободные части вступают в различные химические реакции. Подобно молекулярным инструментам в зале ассемблерных манипуляторов в главе 3 каждый из этих инструментов может использовать химическую

реакцию для переноса некоторых атомов на строящийся молекулярный объект.

Разработка молекулярного набора инструментов была самой сложной частью проекта; это заняло примерно столько же времени, сколько было потрачено на дублирование молекулы палитоксина еще в 1980-х гг. Ни одна из задач, рассматриваемых в проекте, не нуждалась в серьезном научном прорыве, и ни одна не требовала решения сверхсложной инженерной проблемы. Каждая из них имела множество возможных решений, работа состояла в том, чтобы найти совместимый набор решений и применить их на практике. Через несколько лет это им удалось, и исследовательская группа «U. Brob» начала создавать новые молекулы путем молекулярных манипуляций. Сейчас многие команды делают то же самое.

Строительство с помощью молекулярных зажимных устройств и инструментов

Чтобы построить что-то с помощью системы молекулярных манипуляторов на основе АСМ исследовательской группе «U. Brob», необходимо было выполнить следующие операции: во-первых, выбрать поверхность для сборки и поместить ее в резервуар с жидкостью. Затем опустить зажимное устройство АСМ в жидкость, коснувшись поверхности, после чего немного отодвинуть его. Теперь осталось переправить инструмент в зажимное устройство, и строительство молекул можно было начинать.

С помощью трубок и насосов над поверхностью возле зажимного устройства можно пропускать различные жидкости, доставляя нужные молекулярные инструменты. Если вы хотите что-то сделать с инструментом типа А, вы пускаете соответствующую жидкость, и молекула типа А быстро прилипает к зажиму, как показано на рисунке 6. После того, как он оказывается в зажиме, вы можете использовать механизм АСМ, чтобы переместить его по своему желанию. Оказавшись на поверхности в нужном месте, уже через несколько секунд, он вступит в реакцию, образуя связь и оставляя молекулярный фрагмент, прикрепленным к выбранному вами месту. Чтобы добавить другой фрагмент, вы можете использовать инструмент типа В: использовав другое зажимное устройство и пропустив необходимую жидкость, несущую новые инструменты, и через мгновение инструмент нового типа будет прикреплен либо к первому фрагменту, либо рядом с ним и готов к применению.

Так, шаг за шагом, вы создадите точную молекулярную структуру.

Выполнение каждого шага занимает всего несколько секунд. Молекулярные инструменты попадают в зажимные устройства за доли секунды, и срабатывают с такой же скоростью. Как только зажим перемещает молекулу, она немедленно вступает в реакцию, примерно в миллион раз быстрее, чем нежелательные реакции в других местах. Таким образом, молекулярный манипулятор дает хороший контроль над тем, где будут происходить реакции (хотя он не так надежен, как будущий ассемблер). По стандартам химиков все происходит довольно быстро — за цикл — но все же это в миллион раз медленнее, чем сделал бы ассемблер. Он может выполнять различные операции, но не так разнообразно и умело как ассемблер. Короче говоря, едва ли это последнее слово в нанотехнологиях, но это большой прогресс по сравнению с тем, что было раньше.

Продукция

Обладая способностью ускорять желаемые реакции примерно в миллион раз, молекулярный манипулятор исследовательской группы «U. Brob» может выполнять от 10000 до 100000 шагов с хорошей надежностью. Еще в 1980-х годах химики, создающие белковые молекулы, изо всех сил пытались выполнить всего сто шагов. Исследовательская группа «U. Brob» (и ее многочисленные подражатели) теперь могут создавать структуры, которые проектировать легче, чем белки: не разнообразные, свернувшиеся цепи, а устойчивые структуры, удерживаемые вместе прочной сетью связей. Хотя они не так прочны и плотны, как алмаз, они похожи на кусочки жесткого инженерного пластика. Специально адаптированная система автоматизированного проектирования позволяет легко разрабатывать молекулярные объекты, которые могут быть изготовлены из этих материалов.

Тем не менее, молекулярный манипулятор на основе АСМ имеет один серьезный недостаток: химическая реакция добавляет в структуру только одну молекулу. Чтобы изготовить одну большую структуру, он использует машину, по цене сравнимую со стоимостью автомобиля, в течение нескольких часов или дней. Однако, некоторые молекулы достаточно ценны, чтобы их стоило получать даже таким способом. На это следует обратить внимание.

Одна молекула не очень полезна в качестве красителя, лекарства или воска для пола, а вот информация о том, как она

была произведена, может иметь большую ценность. Исследовательская группа «U. Brob» без промедления публикует множество научных работ, основанных на экспериментах с отдельными молекулами: они строят молекулу, исследуют ее, сообщают о результатах и строят другую. Некоторые из этих результатов подсказывают остальным химикам, занятым в многомиллиардной химической промышленности, как разрабатывать новые молекулы и катализаторы, которые могут помочь сделать другие молекулы более дешевыми, чистыми и эффективными. Эта информация стоит многого.

Три новых продукта, представляющих особый интерес, наверняка будут сделаны одними из первых.

Первый — молекулярная электроника — начинается с экспериментов, проводимых исследовательской группой в компании, изготавливающей компьютерные чипы. Они используют свой молекулярный манипулятор, чтобы построить отдельные молекулы и исследовать их, постепенно обучаясь строить детали, необходимые для создания молекулярных электронных компьютеров. Эти новые компьютеры не сразу станут практичными, потому что затраты для создания таких больших молекул с помощью технологии на основе АСМ слишком высоки. Тем не менее, некоторые компании уже сейчас начинают производить простые молекулярные электронные устройства для использования в датчиках и устройствах специализированной высокоскоростной обработки сигналов. Рождается и начинает развиваться новая отрасль.

Второй продукт — устройство для чтения генной информации (ридер), сложное молекулярное устройство, построенное на поверхности чипа. Биологи, создавшие ридер, объединили белки, заимствованные из клеток, с молекулярными машинами специального назначения, созданными с нуля. В результате получилась молекулярная система, которая связывает молекулы ДНК и протягивает их через считывающую головку как у магнитофона. Устройство работает так же быстро, как некоторые естественные молекулярные машины, которые читают ДНК, с одним ключевым преимуществом: мы получаем данные в электронном виде. При такой скорости одно устройство может считать геном человека примерно за год. Хотя все еще слишком дорого устанавливать ридеры во врачебных кабинетах, они быстро стали пользоваться большим спросом у исследовательских лабораторий. Рождается еще одна небольшая индустрия.

Третий продукт станет важным в долгосрочной перспективе: замена наконечников для молекулярных манипуляторов, захватов и инструментов, которые станут лучше, чем оригиналы. С

помощью этих новых, более универсальных устройств, исследователи в настоящее время создают более продвинутые продукты и инструменты.

Еще один сценарий: следующий шаг к нанотехнологиям

В то время как команда физиков из «U. Brob» заканчивала свою работу над молекулярным манипулятором на основе АСМ, команда химиков в Университете Лилипутии яростно работала. Они увидели, что настольная машина «U. Brob» слишком велика, а ее ожидаемые продукты слишком дороги. Еще в 1980-х годах Дэвид Бигельсен из Исследовательского центра «Xerox Palo Alto» отметил: «Главный недостаток, который я вижу в использовании гибридного протоассемблера (молекулярного манипулятора на основе АСМ), заключается в том, что требуется слишком много времени, чтобы изготовить только один блок. А ведь для создания конечного продукта необходимо сделать целый ряд шагов построения «атом за атомом». Было бы разумнее с самого начала производить их параллельно, делая много триллионов этих молекул одновременно. Я думаю, что параллельная сборка чрезвычайно выгодна. Может быть, химики или биологи предложат лучший способ сделать это». Химики из «U. Lill» стремились разработать этот лучший способ, создавая сначала простые, а затем все более сложные молекулярные машины. В конечном итоге получился примитивный молекулярный ассемблер, способный создавать молекулярные объекты триллионами.

Инструменты химика

Как химики этого добились? В течение многих лет, когда команда «U. Brob» разрабатывала молекулярный манипулятор, исследователи, работающие в области белковой науки и синтетической химии, создавали все лучшие и лучшие системы молекулярных строительных блоков. Химики были хорошо подготовлены к этому: к концу 1980-х годов стало возможным создавать стабильные структуры размером со средние белковые молекулы, и работа стала фокусироваться на том, чтобы заставить эти молекулы выполнять полезную работу путем связывания и модификации других молекул. Химики научились использовать эти сложные катализаторы — начальные молекулярные устройства — чтобы облегчить свою работу, помогая в производстве еще более крупных молекул.

Другим традиционным химическим инструментом стало

программное обеспечение для автоматизированного проектирования. Первые образцы программного обеспечения, разработанного Джеем Пондером и Фредериком Ричардсом из Йельского университета, в конечном итоге привели к полуавтоматическим инструментам для проектирования молекул определенной формы и назначения. Благодаря этому, химики смогли легко создавать молекулы, которые самособирались в более крупные структуры, размером в несколько десятков нанометров.

Молекулярные строительные машины

Достижения в области программного обеспечения и химического синтеза позволили команде «U. Lill» решить задачу создания примитивной версии молекулярного ассемблера. Хотя они не могли построить ничего столь же сложного как нанокомпьютер, или столь же твердого как алмаз, но они и не стремились к этому. В их конструкции использовались скользящие молекулярные стержни для позиционирования молекулярного зажима, во многом подобного зажиму, применяемому в «U.Brob», используя окружающую жидкость для контроля за тем, какой инструмент попадает в зажим. Вместо электронного управления АСМ они использовали для контроля за состоянием стержней окружающую жидкость. В нейтральном растворе стержни будут сокращаться; в кислом растворе расширяться. То, как далеко они могли продвинуться, зависело от того, какие еще молекулы находились вокруг и попадали в специальные карманы, чтобы заблокировать движение.

Их примитивные ассемблеры создавали те же самые продукты, что и молекулярный манипулятор «U. Brob»; инструменты были похожи, да и скорость и точность были примерно одинаковыми. Однако было одно существенное преимущество: около 1 000 000 000 000 000 000 000 ассемблеров «U. Lill» могли поместиться в пространстве, занимаемом одним манипулятором «U. Brob». Поэтому они могли легко производить в 1 000 000 000 000 000 раз больше продукции при той же цене.

С первыми, примитивными ассемблерами, строительство было медленным, потому что каждый шаг требовал новых емкостей с жидкостью и нескольких секунд замачивания и ожидания, а изготовление простого продукта могло занять тысячи циклов. Тем не менее, команда «U. Lill» заработала много денег, лицензируя свою технологию для исследователей, пытающихся продавать продукты, которые они впервые получили на машине

«U. Brob». Создав независимую компанию «Nanofabricators, Inc.», они посвятили свои исследования созданию более совершенных машин. Через несколько лет у них появились ассемблеры с несколькими захватами, каждый из которых был вооружен различными инструментами; вспышки цветного света переводили молекулы из одного состояния в другое (они копировали молекулы с пигментов сетчатки глаза); это новшество позволило менять инструменты и размеры стержня, не используя жидкость. Замачивание и ожидание ушли в прошлое, и вскоре они стали получать заготовки, которые смешивали с жидкостью и добавляли в чашки со специальными чистыми чипами, создавая на них плотные слои памяти, что позволило создать карманную библиотеку.

Именно тогда все начало быстро меняться. Полупроводниковая промышленность пошла по пути создания вакуумных трубок. Деньги и талант стали вкладываться в новые технологии. Инструменты молекулярной САПР стали лучше, ассемблеры упростили сборку того, что было спроектировано, а быстрое производство и тестирование сделали молекулярную инженерию такой же простой, как игра с программным обеспечением. Ассемблеры стали лучше, быстрее и дешевле. Исследователи использовали ассемблеры для создания нанокомпьютеров, а нанокомпьютеры — для управления лучшими, более быстрыми ассемблерами. Использование инструментов для построения лучших инструментов — древняя история. Через десять лет почти все уже могло быть сделано путем молекулярного производства.

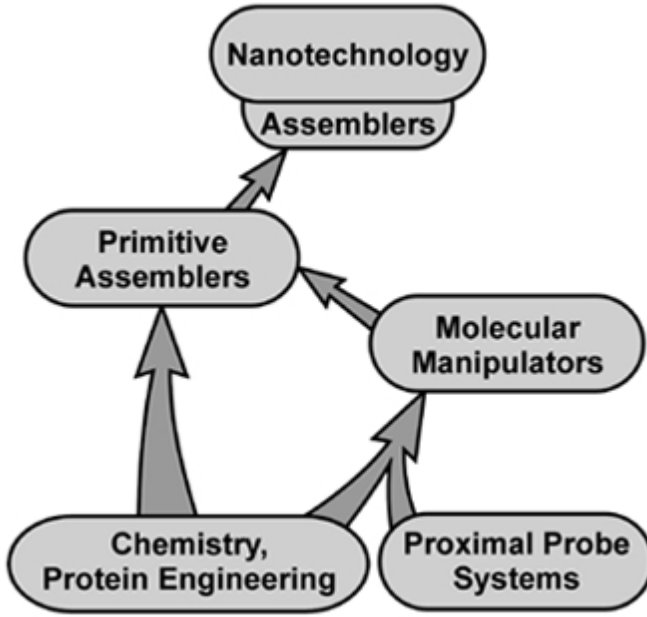


Рисунок 7. ПУТИ РАЗВИТИЯ НАНОТЕХНОЛОГИЙ

Блок-схема развития нанотехнологий

Будет ли развитие событий в последние дни перед прорывом таким, как только что описано? Конечно, нет: технические подходы будут отличаться. И американская академическая исследовательская среда, о которой рассказано в сценарии, может быть легко заменена академической, коммерческой, правительственной или военной исследовательской средой в любой из развитых стран.

Реалистичными кажутся требования, предъявляемые к необходимым усилиям, технологиям и времени появления нанотехнологии. А также описание основных возможностей различных устройств. Мы приближаемся к границе, за которой дальнейшее продвижение вперед станет легким и быстрым.

Глава 6
Работа с нанотехнологиями

В наше время термин «производство» подразумевает огромные, шумные машины, штампующие продукты и оставляющие после себя отходы. Отказ от производимой продукции не популярен и не практичен — почти все, что мы используем сегодня, изготовлено на фабриках. Если бы все продукты машинного производства внезапно исчезли, большинство людей в Соединенных Штатах оказались бы на улице, голыми и почти без всего. Расширение производства является целью почти всех стран на Земле.

Мы не можем отказаться от производства, но мы можем заменить сегодняшние технологии чем-то радикально другим. Молекулярное производство может помочь нам получить то, что мы, кажется, хотим: высококачественные продукты, сделанные по низкой цене, не причиняя при этом вред окружающей среде. В главе 12 будут описаны серьезные проблемы, вызванные неправильным применением нанотехнологий, но пока мы обсудим положительные стороны.

Далее проанализируем появляющиеся возможности — рассмотрим устройства, которые могут быть созданы после достижения точного молекулярного контроля, и то, как люди смогут управлять производственным бизнесом, основанным на наномашинах. Старайтесь не думать об этих набросках как о труднодостижимых предсказаниях того, как все будет сделано на самом деле, считайте это описанием возможностей новых вещей, которые можно будет изготовить, когда нанотехнологии будут освоены. Несомненно, существуют более эффективные способы решения проблем, чем те, которые мы описываем. Как обычно, ссылки на 1980-е годы и до этого исторически точны; в остальном, помните, что наука не выдумка.

Сценарий: «Desert Rose Industries»

«Desert Rose Industries» — многопрофильный оптовый производитель огромного количества мебели, компьютеров, игрушек и оборудования для отдыха, который может быть предметом гордости любого промышленного магната XX века. Но если вы соберете всех сотрудников «Desert Rose» перед штаб-квартирой корпорации, вы увидите, что Карл и Мария Сантос стоят возле здания размером с небольшой четырехкомнатный дом. Этот промышленный гигант является типичным семейным бизнесом, в котором продажами и привлечением клиентов с помощью телекоммуникационной сети занимаются удаленные сотрудники из мест, разбросанных по всей Северной Америке.

Их друзья называют Карла и Марию «старомодными традиционалистами» и дразнят Марию за то, что она оставила Карла на фабрике одного, а сама отправилась в Европу, Азию, Южную Америку и Африку для открытия нового бизнеса. В молекулярно-производственном бизнесе привычные личные качества и достоинства — честность, точность, вежливое общение — так же важны, как и раньше. Мария любит работать с клиентами. Она получила степень бакалавра молекулярного производства в МТИ и магистерскую степень технического дизайна, это помогает ей успешно помогать неуверенным в себе новым конструкторам в их первом производственном опыте, успевая при этом аккуратно и доброжелательно выполнять срочные и специальные заказы, внося при этом необходимые изменения, поступившие в последнюю секунду. Исполнительность и хорошие конструкторские идеи Марии создали ей репутацию отзывчивой к потребностям клиентов исполнительницы. Карл, точный и аккуратный, сделал себе имя качественным производством и своевременными поставками.

За исключением привычки Карла проигрывать записи Гершвина на полную громкость с открытыми окнами, единственные звуки возле «Desert Rose» издают птицы вдоль берегов ручья, который течет по дну каньона; здесь нет шумных машин. Родители Марии основали «Desert Rose» здесь, на старом плавильном заводе, за много миль от жилых поселений. Они переоформили землю и очистили ее от загрязнений. Мария приспособила молекулярный процессор для преобразования тяжелых металлов обратно в стабильные минералы и сваливает их в старую открытую шахту, чтобы помочь заполнить дыру в земле, из которой их в свое время добыли. Пустыня уже почти затянула свои раны, и вдоль ручья снова растут несколько

крепких деревьев.

Новые клиенты приезжают, чтобы лично ознакомиться с производственным процессом, они получают возможность осмотреть все без ограничений: обеденный и конференц-зал, офис Марии, завод-изготовитель и складское помещение для деталей и продуктов. «Завод» — самая большая комната, это гордость Карла. Двенадцать производственных резервуаров, оборудованных системами охлаждения, размером от кухонной раковины до небольшого бассейна. Именно здесь «Desert Rose» использует нанокомпьютеры и ассемблеры для выполнения своих строительных работ. Система труб — кошмар водопроводчиков — проходит между прудами и тройным рядом контейнеров с пояснительными этикетками: углеродное сырье, очищенная платина, структурные волокна четырех размеров и сборные двигатели. У Карла под рукой, в подземном складе, хранится большой запас деталей и сырья. Конечно, некоторые редкие материалы долго не хранятся, но иметь их запас, готовых к использованию — один из секретов Карла, позволяющий не нарушать спецификацию и обеспечивать своевременную доставку. На столе — музыкальная система Карла и компьютеры — потомки IBM PC и Macintoshes 1980-х годов, которые используются для запуска производственного процесса. В помещении размером с большую гостиную у Карла и Марии есть все необходимое для строительства чего угодно: и сырье, и производственное оборудование — нанокомпьютеры и ассемблеры.

Иногда Карл и Мария нуждаются в услугах специализированных инструментов, таких как дизассемблеры, которые могут функционировать только в лабораториях. Дизассемблер работает как археолог, кропотливо исследуя структуру молекулы, не пропуская ни одного атома, чтобы сохранить информацию и проанализировать молекулярную структуру. Поскольку они работают очень медленно, отмечая положение каждой молекулы, дизассемблеры не используются для операций по переработке — было бы дорого и бессмысленно записывать все лишние данные. Но как инструменты для анализа неизвестного, они незаменимы.

Мария получила от клиента заказ на изготовление мебели с тропическим ароматом и оборудования для ресторана, но вместо инструкции по созданию необходимых духов, Мария получила пластиковый пакет, полный коричневой липкой грязи, и записку: «Я раздобыл это вещество в тропиках. Пожалуйста, пусть ткань пахнет также». Мария (понюхав вещество и решив, что оно действительно удивительно хорошо передает запах тропиков)

отправила образец в лабораторию для химического анализа с помощью дизассемблера. Вскоре из лаборатории прислали программное обеспечение с молекулярным описанием вещества и инструкциями по созданию нужного запаха.

Чтобы создать продукт, «Desert Rose Industries» нужны инструкции по проектированию и компьютерное программное обеспечение для ассемблеров. У Карла и Марии имеется собственная библиотека программного обеспечения, но обычно они покупают или арендуют то, что им нужно, или клиенты отправляют свои собственные программы.

Программное обеспечение, которое прислала Аманда, содержит спецификации для производства аварийного оборудования: набор инструкций для запуска на стандартном настольном компьютере. В течение нескольких минут поступают две копии программного обеспечения от Красного Креста в электронном виде. Перед началом сборки, Карл тщательно проверяет, чтобы убедиться, что основная программа и резервная копия тождественны и не были повреждены при пересылке. Если программы будут готовыми к работе и подтверждены печатью Красного Креста, то настольный компьютер передаст их миллионам небольших компьютеров, выступающих в качестве мастеров, управляющих процессом, на рабочем месте.

Нанокомпьютеры

Если первые примитивные ассемблеры управлялись путем замены молекул, находящихся в растворе вокруг устройства, то для достижения скорости и точности, требуемых для крупномасштабного производства, невозможно обойтись без вычислений. Установка Карла использует комбинацию специализированных молекулярных процессоров и универсальных ассемблеров, контролируемых и управляемых нанокомпьютерами.

Компьютеры еще в 1990-х годах использовали микроэлектронику. Они работали, перемещая электрические заряды по проводящим путям — проводам, по сути, используя их для блокирования и разблокирования потока зарядов в других путях. С помощью нанотехнологий компьютеры будут строиться из молекулярной электроники. Как и компьютеры 1990-х годов, они используют электронные импульсы для создания моделей цифровой логики. Однако, поскольку изготовлены из молекулярных компонентов, то они значительно меньше, чем компьютеры 1990-х годов, и работают намного быстрее и эффективнее. В масштабах нашего моделируемого молекулярного мира компьютерные чипы 1990-х годов похожи на ландшафты, а нанокомпьютеры — на отдельные здания. Настольный компьютер Карла содержит более триллиона нанокомпьютеров, этого достаточно, чтобы управлять всеми микроэлектронными компьютерами двадцатого века.

Еще в темные времена 1980-х годов инженер-исследователь предположил, что нанокомпьютеры могут быть механическими, используя скользящие стержни вместо движущихся электронов, как показано на рисунке 8. Эти молекулярно-механические компьютеры были гораздо проще в разработке, чем будущие молекулярные электронные компьютеры. Они оказали большую помощь в получении некоторого представления о том, что может сделать нанотехнология.

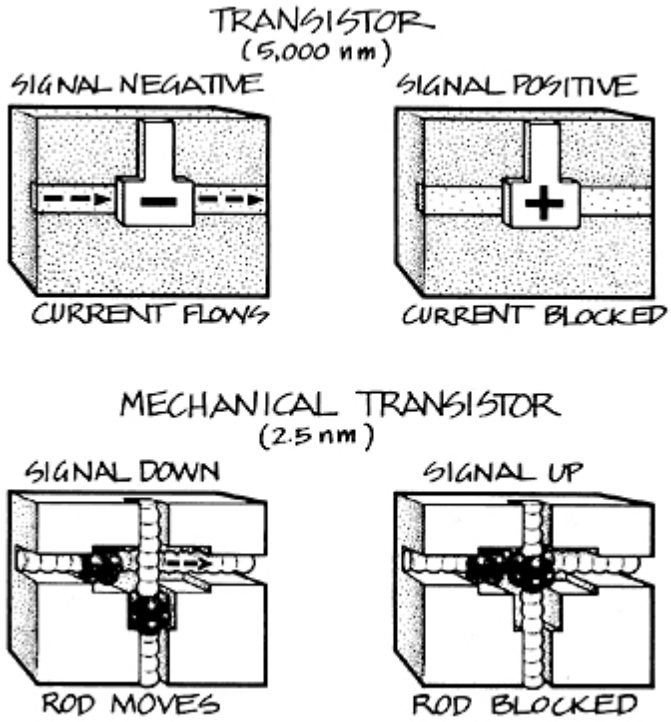


Рисунок 8. МЕХАНИЧЕСКИЙ ТРАНЗИСТОР

Электронный транзистор (вверху) пропускает ток при подаче отрицательного электрического заряда и блокирует ток при подаче положительного заряда. Механический «транзистор» (внизу) позволяет горизонтальному стержню двигаться, когда вертикальный стержень опускается, и блокирует горизонтальный стержень, когда вертикальный стержень поднимается. Подобное устройство может быть использовано для построения логических элементов и компьютеров.

Уже тогда было очевидно, что механические компьютеры будут работать медленнее, чем электронные. Молекулярный электронный компьютер Карла не был бы большим сюрпризом, хотя никто не знал, как его спроектировать. Когда нанотехнологии действительно появились, и люди начали конкурировать в построении лучших компьютеров, молекулярная электроника выиграла гонку технологий. Тем не менее, механические нанокомпьютеры могли бы выполнить все нанокомпьютерные работы в «Desert Rose Industries»: обычное, повседневное молекулярное производство просто не требует наличия самого производительного компьютера.

Для Карла миллионы нанокомпьютеров в молочных водах его

строительных резервуарах являются просто продолжением машин на его столе, способных помочь ему управлять своим бизнесом и доставлять готовую продукцию клиентам — или, в случае чрезвычайной ситуации по линии Красного Креста, обеспечивать срочные аварийные поставки. Зарезервировав для этого три отдельных резервуара, Карл может либо построить три различных вида оборудования для Красного Креста, либо использовать их для массового строительства главного в списке Красного Креста: аварийных убежищ для десяти тысяч человек. Программное обеспечение готово, сантехника в порядке, все резервуары со строительными материалами заполняются, в них загружается специальная смесь для этой работы: сборка готова к запуску. «Ладно, — говорит Карл компьютеру, — построй палатки для Красного Креста». Компьютер передает команду нанокомпьютерам. Во всех трех резервуарах нанокомпьютеры устанавливают связь с ассемблерами. Сборка начинается.

Сборка изделий

Некоторые изделия, построенные в «Desert Rose Industries», используют ассемблеры, очень похожие на те, которые мы видели во время экскурсии в моделируемом молекулярном мире музея Силиконовой долины, в первом зале завода. Как видно из моделирования, это большие, медленные, управляемые компьютером механизмы, перемещающие молекулярные инструменты. С нужными программами и оборудованием, снабженным молекулярными инструментами, эти универсальные ассемблеры могут построить почти все, что угодно. Они медленные, хотя и требуют много энергии для работы. В некоторых случаях используются специальные сборочные системы в стиле молекулярной обработки, какие мы видели в подвале моделируемой молекулярной фабрики. Системы специального назначения — это движущиеся ремни и ролики, но без монипуляторов. Это быстрее и эффективнее, но для больших заказов требования к охлаждению ограничивают скорость.

Если применять большие сборные строительные блоки, получается быстрее. «Desert Rose Industries» использует их для большей части своей работы, и особенно для срочных заказов, таких как тот, который только что получил Карл. Их подземный склад имеет бункеры размером с комнату, содержащие почти тысячу тонн самых популярных строительных блоков, например, структурных волокон. Они производятся на заводах на западном побережье и доставляются сюда по подземным транспортным путям для окончательного использования. Другие блоки изготавливаются на месте с помощью специальных ассемблеров. В главной комнате Карла есть несколько ящиков размером со шкаф, к ним подведены трубы, через которые поступает сырье, там оно прогоняется через специализированное молекулярное оборудование, а потом из них откачивается готовый продукт. Одна выжимка содержит двигатели, другая — компьютеры, а третья полна микроскопических сменных источников света. Все это идет в баки для последующего использования.

И вот начинается работа. Для создания брезента, необходимого для изготовления палаток для Красного Креста, главным образом используется структурное волокно более крепкое, чем старые материалы, использующиеся для пуленепробиваемого жилета. Другие строительные блоки также идут в дело, включая двигатели, компьютеры и десятки маленьких стоек и угловых кронштейнов. Смесь выглядела бы так, будто кто-то перемешал детали из дюжины наборов игрушек,

если бы эти детали были достаточно большими, чтобы их можно было увидеть. На самом деле, самые большие детали были бы не более чем размытыми точками, если бы вы рассматривали их в обычный оптический микроскоп.

Кроме того, смесь содержит блок-ассемблеры, плавающие свободно, как и все остальные детали. Эти машины большие, примерно как офисное здание в нашей модели со стандартными настройками. Каждая из них имеет несколько сочлененных манипуляторов, компьютер и несколько разъемов и розеток. Фактически именно они выполняют строительные работы.

Чтобы начать сборку, насосы закачивают смесь в рабочий резервуар. Постоянные тепловые колебания микроскопических объектов в жидкостях были бы слишком непредсказуемы и мешали изготовлению чего-либо такого большого, как палатка, поэтому блок-ассемблеры начинают объединяться со своими соседями. В течение нескольких мгновений они, распространяясь с помощью жидкости, формируют каркас. Теперь, соединившись, они приступают к совместной работе. Команды поступают с настольного компьютера Карла.

Блок-ассемблеры используют липкие захваты, чтобы вытаскивать определенные виды строительных блоков из жидкости. И с помощью своих манипуляторов соединяют их вместе. Для длительной работы они будут использовать детали, которые накрепко соединяются химически. Однако для изготовления временных палаток по заказу Красного Креста используется набор стандартных деталей, которые соединяются с помощью крепежных элементов, удивительно похожих на обычные. Это защелки, заглушки и винты, хотя, конечно, они состоят исключительно из атомов, а резьба на винтах — это одиночные спиральные ряды атомов. В результате соединения конструкция палатки несколько ослабевает, но кого это волнует? Основные материалы почти в сто раз крепче стали, поэтому излишней прочностью можно пренебречь, если это упрощает производство.

Сегменты волокон соединяются вместе, образуя ткани. Некоторые из них содержат двигатели и компьютеры, соединенные волокнами, выполняющими функции кабеля питания и передачи данных. Стойки соединяются с большим количеством двигателей и компьютеров, чтобы изготовить основные конструкции палатки. Специальные поверхности произведены из готовых строительных блоков. С точки зрения человека, каждая палатка представляет собой легкую конструкцию, которая, однако, снабжена большинством удобств современной квартиры: есть кухня, ванная комната, кровати,

окна, кондиционер, специально модифицированные для удовлетворения экологических требований пострадавшей от землетрясения страны. Но с точки зрения строителя, особенно с точки зрения наномашины, палатка — это просто объект, собранный из нескольких сотен видов сборных деталей.

За считанные секунды каждый блок-ассемблер собирает вместе несколько тысяч деталей, и его секция палатки выполнена. На самом деле, все сделано: многие триллионы рук делают легкую работу. Манипулятор перемещается над резервуаром и начинает вытаскивать тюки с палатками, после чего поступает свежая смесь.

Мария вернулась на завод, чтобы посмотреть, как идет строительство.

— Все в порядке, — успокаивает ее Карл. — Смотри, первая партия палаток уже готова.

На складе на первый поддон уже уложены пять слоев голубовато-серых «тюков»: палатки просушены и упакованы для транспортировки. Карл хватает палатку за ручку и вытаскивает ее за дверь. Там он нажимает на кнопку в углу с надписью «Открыть», и уже через минуту в полдюжине шагов сбоку появляется новое строение. Палатка большая и достаточно легкая, ее наверняка сдуло бы ветром, если бы она не цеплялась за землю так сильно. Мария и Карл осматривают палатку, проверяют бытовую технику и качество мебели: все чрезвычайно легкое по сравнению с объемными изделиями 1990-х годов. Изделие получилось жестким, но почти невесомым.

Как и в других постройках, стены и полы заполнены крошечными двигателями и стойками, управляемыми простыми компьютерами, такими же как те, которые используются в автомобилях двадцатого века, телевизорах и пинбольных машинах. Они могут разворачиваться и складываться. Они способны выгибаться, чтобы усиливать звук, как высококачественный динамик, или поглощать звук, чтобы заглушить шум, доносящийся с улицы. Трехкомнатный номер небольшой и эффективный, выглядит как нечто среднее между каютой лодки и японским гостиничным номером. Снаружи, однако, это напоминает коробку. Мария качает головой, прекрасно понимая, что могут сделать архитекторы в наши дни, когда они стараются сделать здание действительно удобным для проживания. «Ну что ж, — думает она, — это ненадолго».

— По-моему, получилось неплохо, — удовлетворенно говорит Карл. — И я думаю, что через час мы закончим.

Мария вздыхает с облегчением.

— Я рада, что вы так быстро освободили эти бассейны.

К трем часам они отправили заказчикам три тысячи аварийных палаток. И уже через полчаса на месте катастрофы устанавливают палатки.

За кулисами и после этого

«Desert Rose Industries» и другие производители способны сделать почти все быстро и по низкой цене. В том числе туннельные машины и другое оборудование, способное создать систему подземных трасс, которую они используют для доставки продукции заказчикам. Рытье туннеля от побережья до побережья теперь стоит меньше, чем раньше прокладка одного прогона метро под Нью-Йорком. Не так уж дорого было устроить в их подвале станцию подземной доставки. Точно так же, как палатки — это не просто соединение тканей, эти подземки — не прежние медленные дороги, по которым движутся визжащие, трясущиеся металлические коробки. Теперь для достижения скорости самолета они используют магнитную левитацию, как экспериментальные японские поезда в конце 1980-х годов, что позволяет Карлу и Марии быстро обслуживать своих клиентов. К заводу все еще ведет дорога, но по ней уже много лет никто не ездит на грузовиках.

Они используют только те материалы, которые необходимы для изготовления продукции, так что отходов практически нет. И все же часть завода занимается переработкой остатков. Всегда есть какие-то устаревшие детали, от которых нужно избавиться, или детали, которые были повреждены и нуждаются в переработке. Они разбиваются на более простые молекулы и поступают на склад сырья, чтобы вновь потом участвовать в производстве.

Грязь в производственных резервуарах — это вода, смешанная с частицами гораздо более мелкими, чем ил. Частицы — это крепежные детали, компьютеры и все остальное — остаются во взвешенном состоянии, потому что упакованы в молекулярные оболочки, которые удерживают их там. В данном случае используется тот же принцип, что и с молекулами моющего средства, которые обволакивают частицы маслянистой грязи, чтобы очистить от них одежду.

Хотя это вряд ли вкусно или питательно, но вы могли бы пить смесь палатки без вреда для здоровья. Для вашего желудка детали и их оболочки, и даже наномашины, были бы подобны множеству песчинок или опилок. (Бабушка назвала бы это грубой пищей).

Карл и Мария получают энергию от солнечных батарей, размещенных на дороге, и это единственная причина, по которой они ее проложили. Позади их завода стоит что-то похожее на толстую дымовую трубу. Однако все, что из нее вылетает, — это

восходящий поток чистого, теплого воздуха. Темная мощеная дорога, которую нагревает солнце в Нью-Мексико, прохладнее, чем можно было бы ожидать: она впитывает солнечную энергию и производит электричество. При использовании энергии выделяется тепло, которое должно куда-то идти. Для этого используются градирни, расположенные вдоль дороги, а по пути энергия выполняет полезную работу.

Некоторая продукция, например, ракетные двигатели изготовляется медленно и в единственном числе. Это делает их более крепкими и качественными. А вот палатки не должны быть сверхкрепкими и предназначены только для временного использования. Уже через несколько дней после того, как их установят, жертвы землетрясения смогут переехать в новое жилье (постоянное, более красивое и сейсмостойкое). После чего палатки складываются и отправляются на переработку.

Переработка вещей, изготовленных таким образом, проста и эффективна: наномашины просто отвинчивают и отстегивают разъемы и переправляют детали в бункеры. Изделия «Desert Rose Industries» в основном перерабатываются в начальное состояние. Там нет специальной маркировки для переработанных деталей, потому что молекулярные материалы, в любом случае, одинаковы.

Для удобства (и чтобы не делать завод излишне большим), Карл и Мария получают большинство сборных деталей от других производителей, хотя они смогли бы сделать почти все и сами. Они могут даже изготовить производственное оборудование. В одном из своих рабочих резервуарах они могут собрать новый шкаф, полный специальных ассемблеров. Они делают это, когда должны сами сделать новую деталь. Как и все остальное, детали для ассемблеров изготавливают специальные ассемблеры. Карл может даже изготовить предметы большего размеры, чем производственный резервуар, разворачивая их потом как палатки.

Если «Desert Rose Industries» потребуется удвоить мощности, Карл и Мария смогут сделать это всего за несколько дней. Однажды они так и поступили, получив особый заказ на производство секций стадиона. Мария заставила Карла перестроить новое здание, чтобы его тень не закрывала их кактусовый сад.

Фабричное производство

В сценарии «Desert Rose Industries» производство стало дешевым, быстрым, чистым и эффективным. Использование быстрых, точных машин для обработки вещества в молекулярных частицах позволяет нанотехнологии быть быстрой, чистой и эффективной. Но чтобы она стала доступной, производственное оборудование должно быть дешевым.

Сценарий «Desert Rose Industries» показывает, как это может работать. Молекулярно-технологическое оборудование может быть использовано для изготовления всех деталей, необходимых для создания более совершенного молекулярного технологического оборудования. Она даже может строить машины, необходимые для сборки деталей. Это напоминает идею, разработанную НАСА для саморасширяющегося производственного комплекса на Луне, но сделанную быстрее и проще с использованием молекулярных машин и деталей.

Репликаторы

В первые дни возникновения нанотехнологий не будет такого количества различных видов машин, как в «Desert Rose Industries». Одним из способов построить в разумные сроки достаточное количество молекулярного технологического оборудования стала бы возможность сделать машину, которая могла быть использована для изготовления копии самой себя, начиная со специальных, но простых химических веществ. Машина, способная сделать это, называется «репликатором». С репликатором и резервуаром, полным подходящего топлива и сырья, вы можете начать с одной машины, затем получить две, четыре, восемь и так далее.

Этот процесс удвоения полезно использовать для создания большого количества машин. Репликаторы, каждый из которых состоит из компьютера для управления и универсального ассемблера для создания изделий, затем могут быть использованы для изготовления чего-то еще, например, тонны специализированных машин, необходимых для создания завода для «Desert Rose Industries». В этот момент репликаторы могут быть заменены более эффективными машинами.

Однако репликаторы заслуживают более пристального внимания, потому что показывают, как быстро молекулярные строительные системы могут быть использованы для создания большего производственного оборудования. На рисунке 9 показана конструкция, описанная в курсе CS 404 Стэнфордского университета весной 1988 года. Если бы мы оказались в одном из наших стандартных видов моделирования, субмикроскопическое устройство в верхней части изображения было бы похоже на лежащий на боку огромный танк высотой в три этажа. Большая часть его занята системой ленточной памяти, которая обеспечивает нужное перемещение манипулятора для сбора всех частей репликатора, кроме самой ленты. Лента изготавливается специальным ленточно-копировальным аппаратом. На правом конце репликатора находятся поры для подвода молекул топлива и сырья, а также машины для их обработки. Посередине — инструменты с компьютерным управлением, вроде тех, что мы видели во время поездки на завод. Именно они выполняют большую часть строительства.

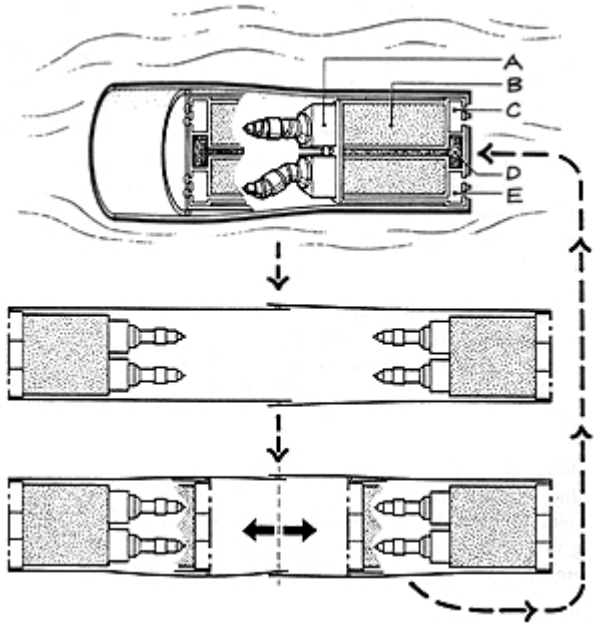


Рисунок 9. РЕПЛИКАТОР

Репликатор способен построить копии самого себя, когда получает достаточно топлива и сырья. На рисунке изображен нанокомпьютер (A), библиотека сохраненных программ (B), оборудование, которое получает топливо и производит электроэнергию (C), двигатель (D) и оборудование, которое готовит сырье для использования (E). (Его объем соответствует расчетам, выполненным в Стэнфорде.) Нижние рисунки иллюстрируют этапы цикла репликации, показывая, как рабочее пространство изолируется от внешней жидкости, которая обеспечивает поступление необходимых молекул топлива и сырья. Репликаторы такого рода полезны в качестве мысленных экспериментов, чтобы показать, как наномашины могут производить больше наномашин, впрочем, реальное оборудование было бы на практике более эффективным.

Шаги в цикле — использование копии для блокировки трубки, начало создания новой копии, затем освобождение старой — иллюстрируют один из способов для машины построить копию себя, плавая в жидкости, но делая всю свою строительную работу внутри, в вакууме. (Вся исследовательская инженерная работа показывает, что легче конструировать в вакууме, поскольку, чем легче конструкция, тем она лучше.) Расчеты показывают, что весь цикл построения может быть завершен менее чем за четверть часа, так как репликатор содержит около миллиарда атомов, а

каждый манипулятор может обрабатывать около миллиона атомов в секунду. При такой скорости одно устройство просто удваиваясь, произведет триллионы копий примерно за десять часов.

Каждый репликатор просто находится в ванне с химическими реактивами, впитывает то, что ему нужно, и создает больше репликаторов. В конце концов, либо специальные химикаты заканчиваются, либо добавляются новые химикаты, чтобы заставить их делать что-то другое. В этот момент они могут быть перепрограммированы, чтобы производить что-то еще, отменив первоначальную задачу. Продукция может быть длинной, может разворачиваться или собираться вместе, чтобы получились более крупные объекты, поэтому размер этих исходных репликаторов — они меньше, чем бактерия — будет только временным ограничением.

Универсальные ассемблеры

Молекулярные манипуляторы и примитивные ассемблеры, описанные в предыдущей главе, и естественный путь развития нанотехнологий ведет к созданию ассемблеров с все более и более универсальными возможностями. Тем не менее, эффективнее использовать специальные машины, и в сценарии «Desert Rose Industries» универсальные ассемблеры, как правило, не применялись. Зачем их вообще создавать?

Чтобы получить ответ, задайте вопрос по-другому и спросите, почему бы не построить такую машину? В создании универсального ассемблера нет ничего особенно сложного, как и в случае с другими молекулярными машинами. Это будет просто устройство с хорошим, гибким позиционным управлением и системой подачи в него различных молекулярных инструментов. Это полезная, базовая возможность. Универсальные ассемблеры всегда могут быть заменены множеством специализированных устройств, но для их создания имеет смысл в первую очередь придумать более гибкую универсальную систему управления, которую можно было бы перепрограммировать.

Таким образом, машины общего назначения, вероятно, найдут применение в создании коротких производственных циклов для более специализированных устройств. Ральф Меркл, эксперт по компьютерам и безопасности в Исследовательском центре «Xerox Palo Alto Research Center», считает это повторением того, как сегодня работает производство: «Устройства общего назначения могут выполнять многие задачи, но они будут делать их неэффективно. Для любой задачи существует один или несколько способов выполнить ее лучше, а также одно или несколько устройств специального назначения, которые точно настроены для выполнения каждой конкретной задачи. Гвозди не производятся в универсальном механическом цехе, они сделаны на гвоздильных машинах. Изготовление гвоздей в универсальном механическом цехе было бы более дорогим, более сложным и более трудоемким. Точно так же в будущем мы вряд ли столкнемся с широким применением универсальных самореплицирующихся систем, для каждой задачи будут созданы специальные машины».

Какие возможности мы получим?

Мы рассмотрели множество устройств: это ассемблеры на все вкусы, нанокомпьютеры, дизассемблеры, репликаторы и другие. Важно не конкретное различие между ними, а те возможности, которые они дадут, и то влияние, которое они окажут на человеческую жизнь. Опять же, мы приостанавливаем обсуждение возможных опасных применений до следующих глав.

Если мы разберем последствия того, что мы видели в сценарии «Desert Rose Industries», мы сможем проанализировать некоторые из ключевых последствий молекулярного производства в промышленности, науке и медицине.

Технологии и промышленность

В своей основе нанотехнологии связаны с молекулярным производством, а производство является основой большей части современной промышленности. Вот почему «Desert Rose Industries» стала хорошей отправной точкой для описания возможностей нанотехнологического мира. С промышленной точки зрения имеет смысл рассматривать нанотехнологии с точки зрения продукции и производства.

Новые продукты

Сегодня мы обращаемся с веществом грубо, но нанотехнологии принесут тщательный контроль над структурами вещества, способность строить объекты по атомным спецификациям. Это означает, что вы можете сделать почти все, что угодно. Для сравнения, даже сегодняшний ассортимент продукции будет выглядеть очень ограниченным. Нанотехнологии сделают возможным огромный спектр новых продуктов, диапазон, который мы сегодня не можем представить. Тем не менее, чтобы почувствовать, что это возможно, мы можем рассмотреть некоторые легко воображаемые приложения.

Надежная продукция

Сегодня продукция часто выходит из строя, но для того, чтобы произошли сбои — падение с самолета из-за оторвавшегося

крыла или износа подшипника — необходимо, чтобы многие атомы оказались не на своем месте. В будущем мы можем добиться большего. Для этого есть два основных способа: использование лучших материалов и лучший контроль качества, оба достигаются с помощью молекулярного производства. Используя материалы в десятки раз прочнее стали, как это сделала «Desert Rose Industries», будет легко производить вещи, которые очень прочны и рассчитаны на длительное использование. Создавая вещи и контролируя положения каждого атома, можно добиться того, что ошибки при производстве станут очень редкими и чрезвычайно незначительными — несущественными по нынешним стандартам.

Используя нанотехнологии, мы можем проектировать с большим запасом прочности, а затем изготавливать практически совершенные изделия. В результате получим прочную и надежную продукцию. (Нельзя отрицать, что все равно останутся плохие проекты и люди, которые захотят создавать машины, балансирующие на грани катастрофы).

Интеллектуальные продукты

Сегодня мы, как правило, изготавливаем изделия из больших кусков металла, дерева, пластика и т. п. Или из сплетенных волокон. Объекты, созданные с помощью молекулярного производства, могут содержать триллионы микроскопических двигателей и компьютеров, образующих детали, которые должны работать вместе, чтобы сделать что-то полезное. Веревка альпиниста может быть изготовлена из волокон, которые скользят и переплетаются, чтобы устранить потертости. Палатки могут быть сделаны из деталей, которые скользят и фиксируются, чтобы развернуться из тюка в постройку. Стены и мебель смогут самостоятельно ремонтироваться, не допуская естественного износа.

На обыденном уровне такая гибкость повышает надежность и долговечность. Кроме того, позволит создавать новые продукты с характеристиками, которые пока достичь не удавалось, и в которых мы так нуждаемся. И помимо этого, это откроет новые возможности для творчества.

Недорогое производство

Сегодня требуется затратить много труда, либо для

изготовления вещей, либо для создания и обслуживания машин, которые производят вещи. Труд стоит дорого, а дорогие машины тоже делают автоматизацию дорогой. В сценарии «Desert Rose Industries» мы получили представление о том, как молекулярное производство может сделать производство намного дешевле. Это, пожалуй, самый удивительный вывод о нанотехнологиях, поэтому мы подробнее рассмотрим его в следующей главе.

Чистое производство

Современное производство обрабатывает сырье довольно грубо, что приводит к загрязнению окружающей среды. Любые операции не обходятся без отходов; приходится смывать их с продукта в водопровод. Наша транспортная система усугубляет проблему, поскольку ненадежные грузовики и танкеры разливают вредные химические вещества по суше и морю. Борьба с загрязнением обходится дорого, поэтому компании экономят даже на полуэффективных средствах очистки, известных нам.

Нанотехнология будет означать больший контроль над веществом, что позволит легко избежать загрязнения. Это означает, что даже небольшое общественное влияние будет иметь большое значение для борьбы за чистоту окружающей среды. Кроме того, это позволит легко повысить эффективность и сократить потребности в ресурсах. Такие изделия, как палатки Красного Креста, которые производят в «Desert Rose Industries», могут быть изготовлены из соединяющихся, легко перерабатываемых деталей. Сложные изделия также могут создаваться из биоразлагаемых материалов. Нанотехнологии позволят легко устранять причины загрязнения уже при производстве.

Нанотехнологии найдут отличные применения в области промышленности, так же как транзисторы широко использовались в области электроники одновременно с вакуумными трубками, а демократия — в монархических странах. Это не столько поддержит индустрию двадцатого века, сколько заменит ее — не сразу, конечно, а в течение небольшого отрезка исторического времени.

Наука

Химия: сегодня химики работают с огромным количеством молекул и изучают их, используя остроумные, но косвенные

методы. Создание новой молекулы может быть крупным проектом, и изучение ее тоже. Молекулярное производство поможет химикам получать то, что они хотят изучать, и это позволит им создавать инструменты, необходимые для их изучения. Наноинструменты будут использоваться для того, чтобы перемещать, измерять и модифицировать молекулы множеством способов, изучая их структуры, поведение и взаимодействия.

Материалы

Сегодня ученые-материаловеды производят новые сверхпроводники, полупроводники и конструкционные материалы путем перемешивания, дробления, нагревания, замораживания и так далее. Они мечтают о гораздо большем количестве структур, чем они могут создать, и они натыкаются на что-то большее, чем планируют. С молекулярным производством материаловедение может стать гораздо более систематическим и успешным. Новые идеи могут быть проверены, потому что появилась возможность синтезировать материалы в соответствии с планом (вместо того, чтобы импровизировать, отыскивая нужный рецепт).

Это не должно исключать неожиданных открытий, поскольку экспериментов — даже слепых поисков — будет все больше. Достаточно нескольких тонн сырья, чтобы создать миллиард образцов, каждый размером в кубический микрон. За всю историю ученые в области материалов никогда не испытывали так много материалов. Такую возможность они получат после создания наноинструментов и нанокомпьютеров. Одна лаборатория сможет сделать больше, чем все сегодняшние ученые в области материалов, вместе взятые.

Биология

Сегодня биологи используют множество природных молекулярных устройств, для развития своей науки. Многие из них можно рассматривать как молекулярные машины. Нанотехнология значительно продвинет биологию, предоставляя исследователям лучшие молекулярные устройства и наноинструменты. Молекулярные детали некоторых клеток уже изучены с удивительной точностью, но биологии еще предстоит пройти большой путь. Используя наноинструменты (включая

дизассемблеры, работающие с отдельными атомами), биологи, наконец, смогут полностью обследовать клетки и детально изучать их взаимодействия. Станет легче не только находить молекулы в клетках, но и устанавливать их функцию. Это поможет понять причины возникновения болезней и молекулярные основы здоровья, чрезвычайно продвигая возможности медицины.

Вычисления

Сегодня компьютеры работают в миллион-миллиард раз быстрее, чем старые настольные машины, этот результат оказался революционным для науки. Каждый год на все больше количество вопросов можно ответить с помощью расчетов, основанных на известных принципах физики. Появление нанокомпьютеров — даже медленных, жалких, механических нанокомпьютеров — позволит увеличить мощность современных компьютеров (по сути, позволяя нам упаковывать триллион компьютеров в небольшом пространстве, не затрачивая при этом слишком много денег или энергии) в три раза. Последствия и в этом случае будут революционными.

Физика

Известные принципы физики достаточны для понимания молекул, материалов и клеток, но не для понимания явлений в масштабе, который все еще был бы субмикроскопическим, если бы атомы были размером с мраморные шарики. Нанотехнология здесь не может помочь напрямую, но она может предоставить производственные мощности, которые сделают огромные ускорители частиц экономичными, в то время как сегодня они требуют больших ассигнований из национальных бюджетов.

В целом, нанотехнологии помогут науке там, где важны точность и изучение мелких деталей. Наука часто работает, внося небольшие изменения в почти идентичные эксперименты и сравнивая результаты. Это будет легче сделать, когда молекулярное производство может создать два одинаковых объекта, молекула за молекулой. В некоторых областях сегодняшние методы не только грубые, но и разрушительные. Археологические раскопки являются уникальным способом узнать о человеческом прошлом, но современные методы раскопок уничтожают большую часть информации, даже не замечая этого.

Будущие археологи, способные просеивать почву не крупинками, а молекулами, будут действительно благодарны тем археологам, которые сегодня оставляют интересную им землю нетронутой.

Медицина

Из всех областей, где важно умение производить новые инструменты, медицина, пожалуй, самая перспективная. Человеческое тело устроено сложно, и эта сложность простирается за пределы человеческого зрения, за пределы микроскопических изображений, вплоть до молекулярного масштаба. «Молекулярная медицина» сегодня становится все более популярным термином, но сегодня она вооружена только самыми простыми молекулярными инструментами. Поскольку биология использует наноинструменты для изучения болезней и здоровья, мы изучаем физические требования для восстановления и поддержания здоровья. Новые знания приведут к появлению инструментов, необходимых для удовлетворения этих требований. И для улучшения фармацевтических препаратов, и для восстановления клеток и тканей с помощью молекулярной хирургии.

Передовая медицина станет одним из самых сложных и трудных приложений нанотехнологий. Она потребует больших знаний, но наноинструменты помогут собрать нужную информацию. Возникнут большие технические задачи, но компьютеры, чья мощность будет увеличена в триллионы раз, помогут с ними справиться. Медицинские проблемы, на которые мы сегодня тратим миллиарды долларов, в надежде на скромные улучшения, будут успешно решены.

В наше время современная медицина часто представляет собой дорогой способ продлить страдания. Будет ли наномедицина в будущем такой же? Любой читатель старше, скажем, тридцати лет знает, как это бывает: что-то болит, появляются морщины, снижается активность. На протяжении десятилетий физическое качество жизни снижается все быстрее и быстрее — возможности организма сужаются — а потом ограничиваются пределами больничной койки. Способности к восстановлению, которыми мы обладали в молодости, исчезают. Современная медицинская практика тратит большую часть своих усилий на содержание людей в отделениях интенсивной терапии, растягивая последние несколько лет жизни, не в силах восстановить его здоровье.

По-настоящему передовая медицина сможет восстановить и

дополнить юношескую способность к выздоровлению. Ее стоимость будет зависеть от стоимости производства очень сложных вещей, о которых мы пока не знаем, от стоимости производства компьютеров, датчиков и тому подобного оборудования. Пока речь идет о триллионах. Чтобы понять перспективы развития медицины, а также науки и промышленности, нам необходимо более внимательно посмотреть на стоимость молекулярного производства.

Глава 7
Спираль возможностей

В предыдущих главах мы заглядывали в будущее и возвращались обратно. Последний шаг был большим: прыжок от небольших лабораторных приборов к высокопроизводительной промышленной компании в сценарии «Desert Rose Industries». Наш рассказ преодолел эту дистанцию одним прыжком, но мир пока этого сделать не может. Чтобы понять, как будут развиваться нанотехнологии, имеет смысл рассмотреть некоторые из ее приложений и простых, и более сложных. Конечно, не в наших силах составить точный график работ или перечислить последовательность этапов, которые необходимо выполнить для создания нанотехнологий. Но мы сможем получить полное представление о том, что произойдет, когда нанотехнология станет развиваться от простого, грубого и дорогостоящего начала к состоянию большей сложности и меньшей стоимости.

Повышение качества

Молекулярное производство позволит улучшить качество продукции. Скорее всего, мы увидим первые применения нанотехнологий как минимум в двух областях: будут получены более прочные материалы и более быстрые компьютеры. Прочные материалы получить проще, и от них будет трудно отказаться. Компьютеры сложнее, но выигрыш от их использования будет огромным.

Компьютеры

Компьютерная индустрия находится под постоянным давлением, от нее требуют постоянно уменьшать размеры компьютерных чипов. И действительно, размеры уменьшаются, цены падают, а эффективность и возможности увеличиваются. Дальнейшее продолжение этого процесса заставит развивать нанотехнологии; и это может стать одним из основных мотивов развития технологии.

Джон Уокер, основатель «Autodesk», объясняет:

«Технологии, даже с огромным потенциалом, могут развиваться медленно, если возникают проблемы с финансированием и разработчики не получают достаточного вознаграждения. Это одна из причин, из-за которых интегральные схемы развивались так быстро; рынок был готов применять новинки и обогащать новаторов, создавших их.

Похоже ли это на ситуацию с молекулярной инженерией? Думаю, что так и есть. Помня о том, что уже очень скоро мы достигнем предела, когда уменьшать размеры существующей электроники больше нельзя будет. В настоящее время проводится множество исследований в области молекулярной и квантовой электроники. Окупаемость их проста: вы сможете создавать устройства в тысячу раз быстрее, экономичнее и дешевле, чем те, которые мы используем в настоящее время — как минимум в сто раз дешевле, чем рассматриваемые экзотические материалы. А еще это позволит заменить кремний, когда тот исчерпает свои возможности».

Федерико Капассо, руководитель отдела исследований квантовых явлений и устройств в «AT & T Bell Labs», согласен с тем, что исследователи в области электроники будут продолжать настаивать на создании еще меньших устройств, даже когда кремний уже не сможет это обеспечить. Он объясняет, что «в какой-то момент мы столкнемся с трудностями: некоторые люди говорят, что это произойдет, когда точность достигнет ста пятидесяти нанометров, другие думают, что при других размерах. Что будет потом? Трудно представить, что электронная промышленность скажет: «Стоп. Прекратим развиваться, потому что уменьшить устройство еще сильнее мы не можем». С экономической точки зрения, чтобы выжить, отрасль должна будет постоянно вводить новшества».

Стремление компьютерной индустрии к созданию устройств молекулярного размера кажется неизбежным. Современные исследователи изо всех сил пытаются построить молекулярную

электронику, используя старые подходы, пока успехов не видно; благодаря молекулярным манипуляторам у них наконец-то появятся инструменты, необходимые для быстрого и точного эксперимента. Как только успешные проекты будут разработаны, изготовлены и протестированы, появится необходимость научиться производить их в массовом количестве при низких затратах. Конкурентное давление будет жестким, потому что современная молекулярная электроника будет на порядок лучше, чем современные интегральные схемы, что в конечном итоге позволит создавать компьютеры с триллионными возможностями.

Прочные и легкие конструкции

Кроме молекулярной электроники — сложной и на первых порах требующей для получения грамма продукции траты миллиардов долларов — нас интересуют композитные материалы: в большинстве программ они стоят всего один доллар за килограмм, поскольку создать их намного проще. Как только молекулярное производство подешевеет, композитные материалы станут важными материалами.

Они будут использоваться для производства почти всего вокруг нас, от автомобилей и самолетов до мебели и домов. Размер, форма и прочность всех этих изделий определяются внешним каркасом. Уже одно это делает композитные материалы крайне важными для любого производства. И помогает понять, как нанотехнологии могут улучшить продукцию.

Автомобили сегодня в основном сделаны из стали, самолеты из алюминия, а здания и мебель из стали и дерева. Прочность во всех этих случаях напрямую связана с качеством материалов (точнее, прочность зависит от плотности). Чтобы автомобили стали надежнее, они должны быть массивнее; если сделать их легче, они будут менее надежными. Хорошая конструкция может немного изменить это соотношение, но чтобы изменить его, нужно использовать другие материалы.

Сделать что-то тяжелее легко: просто оставьте пустое пространство, затем заполните его водой, песком или свинцовой дробью. Сделать что-то легче и прочнее сложнее, но часто это важно. Автопроизводители стараются сделать автомобили легче, производители самолетов заинтересованы в этом еще больше, а у производителей космических аппаратов это навязчивая идея. Уменьшение массы экономит материалы и топливо.

Самые прочные материалы, используемые сегодня, в основном сделаны из углерода. Кевлар, используемый для изготовления гоночных парусов и бронежилетов, содержит богатые углеродом молекулярные волокна. Для производства теннисных ракеток и реактивных самолетов применяются дорогие графитовые композиты, созданные с использованием чистых углеродных волокон. Идеальные волокна из углерода — как графита, так и алмаза — были бы еще лучше, но их невозможно сделать с помощью современных технологий. Однако, как только молекулярное производство начнет развиваться, такие материалы станут обычными и недорогими.

Какими будут эти материалы? Чтобы представить их, воспользуемся аналогией с деревом. Структура древесины может

быть очень легкой и пористой, как у пробкового дерева, или более плотной, как у дуба. Древесина образуется в растениях на молекулярном уровне из богатых углеродом полимеров, в основном из целлюлозы. Молекулярное производство сможет изготавливать подобные материалы, причем с отношением прочности к массе примерно в сто раз превосходящим показатели средней стали, и в десятки раз лучше, чем у лучших сортов стали. Вместо того чтобы изготавливать эти материалы из целлюлозы, можно будет использовать углерод и получить в итоге что-то напоминающее алмазы.

Алмаз упоминается здесь не потому, что он блестящий и дорогой, а потому, что он прочный и потенциально дешевый. Алмаз — это углерод с правильно расположенными атомами. Компании уже учатся делать их из природного газа под низким давлением. Молекулярное производство сможет делать сложные вещи из материала, который легче пробкового дерева, но прочнее стали.

Продукция, изготовленная из таких материалов, может значительно превосходить современные требования. Могут быть изготовлены объекты, которые по размеру и форме идентичные изготовляемым сегодня, но одновременно прочнее и на 90 процентов легче. Об этом следует помнить каждый раз, когда вы тащите что-то тяжелое. (Если какой-то предмет нуждается в дополнительном весе для устойчивости, проще было бы добавить балласт, чем постоянно наращивать его вес).

Более качественные композитные материалы сделают самолет легче, прочнее и эффективнее, но наибольшее влияние они окажут на создание космических кораблей. Сегодня космический корабль имеет ограничения и по прочности, и по массе груза, выводимого на орбиту. Чтобы выйти на орбиту, ракеты должны сбрасывать по пути отработанные ступени, чтобы уменьшить свой вес. С прочными материалами все изменится: как в сценарии космических путешествий для бизнеса в главе 1, космические корабли станут больше похожи на современные самолеты. Они будут прочными и надежными, достаточно прочными и достаточно легкими, чтобы выходить на орбиту самостоятельно.

Ускорение развития

В некоторых областях высоких технологий (например, в космонавтике) требуются годы, даже десятилетия, чтобы воплотить в жизнь новую идею. Это значительно замедляет прогресс. В других областях — программное обеспечение является тому ярким примером — новые идеи могут быть проверены за считанные минуты или часы. С тех пор, как проект «Спейс шаттл» был заморожен, появилось программное обеспечение для персональных компьютеров, которое прошло несколько циклов коммерческих разработок, в каждом из которых было много этапов разработки и тестирования.

Быстрое и недорогое тестирование

Когда появятся первые действующие молекулярные манипуляторы, эксперименты с ними, вероятно, будут достаточно быстрыми. Отдельные химические опыты могут занимать секунды или меньше. Сложные молекулярные объекты могут быть синтезированы в считанные часы. Это позволит реализовывать новые идеи практически немедленно, сразу после того, как они были разработаны.

Позже ассемблеры станут еще быстрее. Выполняя свои операции за миллионную долю секунды, они будут приближаться к скорости компьютеров. И, по мере развития нанотехнологий, у экспериментаторов будет все больше и больше молекулярных инструментов, которые помогут им выяснить, работают их устройства или нет. Быстрый синтез и быстрое тестирование будут способствовать быстрому прогрессу.

На данный момент стоимость материалов и оборудования для экспериментов будет незначительной. Никто сегодня, не обладая достаточным бюджетом, не может позволить себе создавать лунные ракеты, а вот создание программного обеспечения требует меньших затрат, и в результате появилось много полезных программ. Нет никаких экономических причин, по которым наномашины в конечном итоге не могли бы быть построены даже с маленьким бюджетом, хотя есть причины — они будут обсуждаться в последующих главах — которые могут заставить ограничивать возможные разработки.

Экспериментирование

Совершенствование привычных технологий рано или поздно наталкивается на ограничение; доступные возможности, как правило, использовались. Во многих областях ограничены свойства используемых материалов, а также стоимость и точность изготовления. Это верно для компьютеров, космических кораблей, автомобилей, блендеров и обуви. Для программного обеспечения это пределы производительности компьютера и его сложности (то есть человеческого интеллекта). После того, как молекулярное производство достигнет определенных базовых возможностей, будет преодолен целый ряд ограничений, и появится возможность начать целый ряд разработок. Пределы, установленные свойствами материалов, а также стоимостью и точностью изготовления, будут значительно расширены. Появление конкуренции, новые возможности и способность проводить недорогие эксперименты, сложившись, приведут к взрывному производству новых продуктов.

Таблица развития науки и технологий

Космос
Физика. Зондирующие ракеты
Компьютеры
Математика. Электроника
Нанотехнологии
Теоретическая химия. Химический синтез

Решающее продвижение

Космос
Команды объединяют и совершенствуют технологии
Компьютеры
Команды объединяют и совершенствуют технологии
Нанотехнологии
Команды объединяют и совершенствуют технологии

Пороговая возможность

Космос
Первый спутник
Компьютеры
Первый компьютер
Нанотехнологии
Первый ассемблер

Раннее практическое применение

Космос
Спутники погоды, разведки и связи
Компьютеры
Научные расчёты. Расчет заработной платы
Нанотехнологии
Молекулярные датчики. Молекулярные вычисления

Возможность прорыва

Космос

Обычный, недорогой космический полет
Компьютеры
Мощные настольные компьютеры для массового рынка
Нанотехнологии
Мощное недорогое молекулярное производство

Дальнейшие прогнозируемые события

Космос
Лунная база. Исследование Марса
Компьютеры
Широкое распространение электронных публикаций
Нанотехнологии
Новые медицинские возможности
Новые, недорогие продукты

Более продвинутые разработки

Космос
Горное дело. Разработка.
Расселение по солнечной системе
Компьютеры
Крупная автоматизация инженерного проектирования
Нанотехнологии
Помощь в компьютерных расчетах.
Экологическое очищение

Еще более продвинутые разработки

Космос
Межзвездный полет и расчет его осуществимости
Компьютеры
Триллионная мощность компьютера
Нанотехнологии
Помощь в компьютерных расчетах.
Общий ремонт тканей

Это не означает, что это произойдет очень быстро, и распространяется, конечно, не на все возможные направления нанотехнологий. Некоторые технологии мы себе представляем и знаем, как их можно реализовать, правда, сделать это пока очень

сложно. Тем не менее, наши рассуждения позволяют сделать вывод, что очень скоро для этого могут появиться широкие возможности. Основным узким местом может оказаться нехватка знающих проектировщиков — вряд ли кто-то хорошо владеет одновременно и химией, и проектированием машин — решить это поможет улучшение компьютерного моделирования. Инженеры смогут работать над конструкциями молекулярных механизмов, не нарушая химических законов, при этом, не изучая химию серьезно.

Сложности развития

Создание привычных изделий из усовершенствованных материалов позволит производить их больше, повысит их безопасность и полезность. Это простейшая инженерная задача. Больше проблем возникнет при изготовлении незнакомой продукции, что станет возможным благодаря новым методам производства. Говоря о незнакомых изделиях, возникает трудный вопрос: чего хотят люди?

Продукты, как правило, создаются потому, что в них нуждаются потребители. Если мы сейчас начнем обсуждать создание чего-то ненужного людям то, вероятнее всего, это никогда не будет сделано, а если и появится, то очень скоро исчезнет. (Исключения — мошенничество, принуждение, постоянные ошибки — важны, но в других контекстах). Чтобы подкрепить наши рассуждения, имеет смысл рассматривать не совершенно новые продукты, а новые функции для старых продуктов или новые способы предоставления известных услуг. Этот подход не будет охватывать все возможные новшества, но, по крайней мере, он будет начинаться с чего-то разумного и станет трамплином для воображения.

Как и прежде, мы описываем возможности, а не прогнозируем. Возможности, о которых мы сейчас будем говорить, возникают при более сложном применении молекулярного производства, при котором для создания нанотехнологических продуктов будут использоваться наномашины, когда они будут созданы. Ранее мы обсуждали прочные материалы. Теперь мы обсудим некоторые умные материалы.

Умные материалы

Цель сделать материалы и объекты умными не нова: исследователи уже пытались создать структуры, способные воспринимать внутренние и внешние условия и соответствующим образом адаптироваться. Издается даже «Журнал интеллектуальных материальных систем и структур». Используя в датчиках и компьютерах материалы, способные менять форму, инженеры начинают создавать объекты, которые они называют «умными». Это предки умных материалов, появление которых молекулярное производство сделает возможным.

Сегодня мы привыкли, что у автомобилей есть несколько видимых движущихся частей. Колеса вращаются, дворники двигаются взад и вперед, антенна может подниматься и опускаться, ремни безопасности, зеркала и руль могут приводиться в движение мотором. Для этого используются маленькие, недорогие и достаточно надежные электродвигатели, поэтому они широко распространены. В результате получаются довольно умные и удобные машины, но делают их неумело и дорого.

В сценарии «Desert Rose Industries» мы видели, как палатки собирались из триллионов субмикроскопических мелких деталей, включая двигатели, компьютеры, волокна и распорки. Невооруженным глазом материалы, изготовленные из этих частей, могут казаться такими же гладкими и однородными, как кусок пластика, или со сложной текстурой, как дерево или ткань, — все это зависит от расположения и внешнего вида субмикроскопических деталей. Эти двигатели и другие детали стоят менее триллионной доли доллара за штуку. Они могут быть достаточно надежными, а хорошая конструкция может обеспечить бесперебойную работу систем, даже если выйдет из строя 10 процентов от триллиона двигателей. Аналогично для компьютеров, управляющих двигателями и остальным. Получающиеся машины могут быть очень умными и разнообразными, по сравнению с современными, и недорогими.

Когда материалы могут быть заполнены двигателями и регуляторами, отдельные куски материала могут быть сделаны типовыми и управляемыми. Их применение может быть самым разнообразным.

Сценарий: Умная краска

Нас везде окружают поверхности, и многие из них искусственные — стены, крыши и тротуары. Все они очень важны для людей. Как умные материалы могут использоваться для них?

Революция в технологии пришла и ушла, и вот вы хотите перекрасить свои стены. Вдыхание токсичных растворителей и загрязнение воды при мытье кистей давно забыты, потому что краска была заменена более умными вещами. В середине двадцатого века наблюдался значительный прогресс в производстве красок, особенно в разработке жидкостей, которые были не совсем жидкими — они наносились кистью, но не растекались и не капали под действием собственного веса. Это было улучшением, но новый материал «бумажная краска» стал еще более полезным.

«Бумажная краска» поставляется в коробке со специальным шпателем и ручкой. Она представляет собой твердый кусок, напоминающий деревянный брусок. Следуя инструкциям, вы с помощью ручки обводите область, которую хотите закрасить, пометив ее крестиком; линия наносится нетоксичными исчезающими чернилами, так что вы можете сделать это, не опасаясь появления пятен. Используя шпатель, вы подцепляете кусок краски — это легко, потому что она напоминает мягкое масло, однако ко всему остальному краска ведет себя как твердое вещество. Это очень умный материал.

Затем вы помещаете кусок краски на крестик и начинаете выравнивать его шпателем. Каждое действие оставляет широкую полосу, гораздо шире, чем сам шпатель, однако краска всегда остается в пределах ограничительной линии. В конце концов, вся отмеченная область покрыта, и краска самостоятельно распределяется в однородный слой. Почему она не выходит за границы? Опыт показал, что клиенты иногда пытаются проверить, так ли это, но каждый раз оказывается, что это невозможно.

«Бумажная краска» состоит из огромного количества наномашин с маленькими колесиками для перемещения и маленькими липкими подушками для сцепления с поверхностью. У каждой из них на борту есть простой, примитивный компьютер. Каждая может подать сигнал своим соседям. Все они держатся вместе, как обычное твердое тело, но, получив сигнал, они могут скользить относительно друг друга контролируемым образом. Когда вы воздействуете на них шпателем, они получают команду двигаться и распространяться. Когда натыкаются на линию, то останавливаются. До этого они свободно растекаются, а потом все равно останавливаются, пока вы не подтолкнете их снова. Когда все пространство внутри линии заполнено, наномашины толкаются друг с другом, вынуждено формируя гладкий,

однородный слой. Все, что соскребают, — это просто много пыли, поскольку они очень хорошо склеиваются друг с другом.

Эти красящие вещества не промокают, не пачкаются и достаточно плотно прилипают к поверхности, чтобы предотвратить их случайное отслоение. Если какой-нибудь балующийся ребенок начнет тыкать покрашенную стену палкой, порвет слой краски и отковыряет немного, ее можно будет снова разгладить, и стена снова станет как новая. Ребенок может даже съесть кусок, но тщательное регулирование и тестирование гарантируют, что это безопаснее, чем проглотить обычную бумагу, и тем более, красочную страницу воскресной газеты.

Возможны и необходимые усовершенствования. Воздействуя штапелем, можно некоторые участки сделать толще или тоньше, а также заделать небольшие дырки в стене (больше никаких пятен не будет!). С достаточно умной краской и возможностью управлять ее внешним видом, можно будет выбирать понравившуюся текстуру. Любая хорошая конструкция такой краски позволит мыть ее в случае загрязнения, а лучшая конструкция будет автоматически удалять грязь с помощью микроскопических щеток.

И очистить стенку легко: либо вы просто отрываете краску (скребок не требуется), либо используете шпатель, установив переключатель на ручке в положение «зачистки» и несколько раз коснувшись стены. В любом случае, вы получите кусок исходного материала, который можно отправить в мусорную корзину, и чистую старую стену, какой она была до покраски.

Краска как источник энергии

Возможно, только что описанная умная краска никогда не будет создана именно такой, как мы это описали. Было бы обидно, если бы к тому времени, когда появление умной краски станет технологически возможно, не будет придумано что-то лучше. Тем не менее, «бумажная краска» дает представление о некоторых возможностях новых умных продуктов, таких как повышенная пластичность и улучшенный контроль. Не добавляя еще больше возможностей в нашу краску (хотя нет никаких причин, почему бы этого не сделать), давайте посмотрим на некоторые другие умные свойства, которые могут потребоваться при работе с поверхностями.

Наружные стены, крыши и дорожное покрытие подвергаются воздействию солнечного света, а солнечный свет несет энергию. Доказана способность молекулярного оборудования

преобразовывать солнечный свет в полезную энергию: растения делают это каждый день. Даже сейчас мы можем создавать солнечные батареи, которые преобразуют солнечный свет в электричество с эффективностью около 30 процентов. Молекулярное производство может не только сделать солнечные батареи намного дешевле, но и сделать их достаточно крошечными, чтобы можно было встроить их в мобильные строительные блоки умной краски.

Чтобы быть эффективной, эта краска должна быть темной, то есть поглощать много света. Черный цвет был бы лучшим, но даже светлые цвета могут генерировать некоторую энергию, но эффективность — это еще не все. Как только краска будет нанесена, ее строительные блоки соединятся вместе и объединят выработанную ими электроэнергию, которую можно будет затем использовать. Более густая и грубая форма этого вида материала может быть использована для восстановления поверхности тротуара, генерирования энергии и передачи ее на большие расстояния. Поскольку умное покрытие для солнечных батарей может быть спроектировано и для лучшего сцепления с дорогой, а подобный кровельный материал может обладать повышенной герметичностью, материал должен быть популярен.

В солнечный день участок дороги размером всего в несколько шагов будет вырабатывать киловатт электроэнергии. При наличии хороших аккумуляторов (и достаточного количества дорог, оснащенных солнечными батареями), нынешние потребности в электроэнергии могут быть удовлетворены без сжигания угля, без импорта нефти, без ядерной энергетики, без гидроэлектростанций и без отвода земли под солнечные электростанции.

Приятная краска, акустическая краска

Свечение светлячков и глубоководных рыб показывает, что молекулярные устройства могут преобразовывать накопленную химическую энергию в свет. Все виды обычных устройств показывают, что электричество может быть преобразовано в свет. Молекулярное производство позволит создать тонкие пленки, в которых яркость и цвет каждого микроскопического пятна можно будет контролировать. Это можно использовать для рассеянного освещения — достаточно покрасить потолок светящейся краской. С более сложным управлением это дало бы чудо (ужас?) видеообоев.

Современные технологии приучили нас к дисплеям, которые

светятся. С молекулярным производством будет легко создавать дисплеи, которые просто меняют цвет, как печатные страницы с изменяющимися чернилами. Хамелеоны и камбала меняют свой цвет, перемещая окрашенные частицы внутри себя, и наномашины могут делать то же самое. На молекулярном уровне они могли бы использовать изменяющиеся красители. Живые омары темно-серовато-зеленого цвета, но при приготовлении становятся ярко-красными. Большая часть этого изменения является следствием «перенастройки» молекулы красителя, которая связана с белком в живом омаре, но выделяется при нагревании. Это, в принципе, механическое изменение меняет цвет; тот же принцип может быть использован в наномашинах, но, конечно, будет обратимо.

Вид поверхности зависит от того, как она отражает или испускает свет. Наномашины и наноэлектроника смогут контролировать его в широких пределах. Они смогут сделать то же самое для звука, управляя искривлением поверхности. В стереосистеме динамик — это подвижная поверхность, а наномашины отлично подходят для того, чтобы заставить вещи двигаться по нашему желанию. Заставить поверхность излучать качественный звук будет легко. Почти так же легко будет создать поверхности, которые способны активно изгибаться, чтобы поглощать звук, так что лающая собака через улицу, наконец-то, не будет слышна.

Умная ткань

Посмотрим пристальнее на среду обитания человека, мы находим там много тканей и сопутствующих материалов, например, ковровые покрытия и обувь. Текстильная промышленность была основой первой промышленной революции, и следующая промышленная революция окажет свое влияние на текстиль.

Благодаря нанотехнологиям даже самые тонкие текстильные волокна могут быть оснащены датчиками, компьютерами и двигателями, для чего понадобятся небольшие дополнительные затраты. Датчики способны оценивать освещенность, тепло, атмосферное давление, влажность, нагрузки и изношенность. Сеть простых компьютеров необходима для интеграции этих данных, а двигатели и другие наномеханизмы для того, чтобы реагировать на них. Обычные, повседневные вещи, такие как ткань и обивка, могут быть изменены согласно вкусам человека — это касается формы, цвета, текстуры, а также подгонки к

конкретным условиям — к изменившейся погоде, физиологическим особенностям человека или жизненной ситуации. Это может быть сделано постепенно или достаточно быстро, если появилась такая необходимость. Одним из результатов может стать типовая одежда «сшитая по одному размеру» (с поправкой на детскую), идеально приспособленная для ношения, теплая зимой, прохладная и сухая летом; короче говоря, нанотехнологии могут дать то, что рекламодатели только обещали. Даже лживая реклама может дать ключ к пониманию человеческих желаний.

На протяжении всей истории человечество стремилось к поиску удобной обуви. С полностью регулируемыми материалами, может быть достигнута, казалось бы, недостижимая цель иметь туфли, которые одновременно хорошо выглядят и удобны при ношении. Обувь может сохранять ваши ноги сухими и теплыми, за исключением Арктики, прохладными, за исключением тропиков, и настолько комфортными, насколько это возможно, когда ею пользуется человек.

Умная мебель

Структуры, способные меняться при необходимости, будут полезны для изготовления мебели. Сегодня мы, конечно, можем приспособить мебель к индивидуальным требованиям, но делается это с трудом и неполным образом. Например, диван, люди могут использовать подушки и перемещать их по своему желанию. Или стул, шарниры которого слегка изгибаются или расширяются в нескольких местах, чтобы можно было выбрать предпочтительное положение из предложенного набора. Иногда можно увидеть мебель, которая якобы делает массаж, но на самом деле только вибрирует.

Эти ограничения являются следствием высокой цены, громоздкости, неуклюжести и ненадежности современных движущихся частей, двигателей, датчиков и компьютеров. С молекулярным производством можно будет легко сделать мебель из умных материалов. Она сможет приспосабливаться к индивидуальным особенностям человеческого тела и его перемещениям, чтобы им было всегда удобно пользоваться. Умные подушки также могли бы лучше реагировать на подсказки в виде похлопываний, рывков и ударов. Что касается массажа — мебель, независимо от того, насколько она совершенна, не сможет полностью заменить массажистку. Тем не менее, обычные массажные процедуры на умном кресле означали бы не

сегодняшнюю «энергичную вибрацию», а нечто вроде «пяти минут шиацу».

И так далее…

Этот обзор потенциала умной материи показал, что мы можем получить стены, которые выглядят и звучат так, как мы хотим, одежду, обувь и мебель, обеспечивающую больший комфорт и чистую солнечную энергию. Но это всего лишь самые предварительные замечания.

Если вам захочется подумать о дальнейших применениях, вот несколько основных правил: детали, изготовленные методом молекулярного производства, могут быть в десятки раз крепче стали, но материалы, изготовленные путем соединения многих компонентов, будут менее прочны. Параметры прочности отдельных деталей могут отличаться в диапазоне от сахарной ваты до стали. Некоторые составляющие материалы будут чувствительны к теплу и при высоких температурах сломаются или сгорят. Многие из них смогут выдержать температуру кипящей воды, но только специальные конструкции будут безопасны для духовки. Цвет, текстура и (обычно) звук должны быть контролируемыми. Стенки должны быть гладкими и герметичными (это требует некоторой хитрости). Движения могут быть довольно быстрыми. Команды должны поступать извне. Хорошими источниками энергии может быть электричество, химические реакции и свет. Если наномашины или умные материалы погружены в жидкость, химическая энергия может поступать из растворенных молекул. Если они находятся под открытым небом, источником энергии может стать фотосинтез. Если объект стационарен, его можно подключить к розетке. Если он передвигается в темноте, то некоторое время должен работать от аккумулятора, а когда тот разрядятся, ему придется остановиться. Учитывая это, многое можно сделать.

«Умный» — это термин относительный. Если вы не считаете, что люди вскоре узнают намного больше об интеллекте и программировании, лучше предположить, что новые материалы будут следовать простым правилам, подобным тем, что позволяют преобразовывать примитивные рисунки, которые можно увидеть на экранах компьютеров. На этих рисунках можно нарисовать изображение прямоугольника, а потом приделать ручки по его углам; потянув за ручку, вы растягиваете или сжимаете прямоугольник, не искажая его углов. Объект, сделанный из умной материи, может сделать то же самое в реальном мире:

коробку можно растянуть до другого размера, а затем снова сделать жесткой; дверь в стене из умного материала может быть разблокирована, ее рама смещена влево, а затем возвращена к нормальному состоянию.

Кажется, нет особых причин делать кусочки умного вещества независимыми, самовоспроизводящимися или токсичными. Умная материя должна стать безопаснее, чем та, которую она заменяет, потому что она будет лучше контролироваться. Аэрозольная краска проникает во все вещи и содержит вредные растворители; описанная выше краска безопасна с этой точки зрения. Это поможет нам сделать правильный выбор и проявить очевидную осторожность, поощряя производство безопасных и экологически чистых вещей.

Сокращение расходов

Наверное, интересно обсуждать появление новой удивительной продукции, но это будет бессмысленным занятием, если их производство будет слишком дорого. Кроме того, надо помнить, что многие люди сегодня не имеют приличной еды, одежды и крыши над головой, не говоря уже о причудливых «нанопустяках».

Затраты имеют значение. В жизни есть нечто большее, чем материальные блага, но без них жизнь несчастна и ограничена. Если товары дорогие, люди стремятся приобрести их; если товаров достаточно, люди могут обратить внимание на что-то другое. Некоторым из нас нравится, что мы уделяем большое внимание материальным благам, но это мнение чаще встречается в богатых странах. Снижение себестоимости продукции является первоочередной задачей, решение ее позволит накормить людей, обеспечить их жильем и построить канализационные системы, чтобы они не умирали от холеры и гепатита. Уже этого достаточно, чтобы понять, что поиск путей снижения производственных затрат является достойной целью.

Для поддержки бедных, защиты окружающей среды и освобождения человеческого потенциала требуются огромные затраты. Давайте подробнее рассмотрим затраты, необходимые для создания молекулярного производства.

Реально ли снизить затраты?

Инфляция создает иллюзию роста затрат, в то время как на самом деле падает цена денег. В краткосрочной перспективе реальные затраты обычно не очень сильно меняются, и это может создать иллюзию того, что они и дальше останутся постоянными, как закон гравитации или законы термодинамики.

В реальном мире, однако, большинство затрат снижается, поскольку они напрямую связаны с количеством человеческого труда, необходимого для производства вещей. Люди могут позволить себе все больше и больше, потому что их труд, с использованием машин, может производить все больше и больше. Это изменение явно проявляет себя, когда сравнивают показатели различных веков и объясняет драматическую пропасть, возникшую между третьим миром и развитыми странами. Повышение уровня жизни стран третьего мира до первого мира приведет к увеличению дохода (уменьшению стоимости рабочего

времени) более чем в десять раз. Что может для этого сделать молекулярное производство?

Произойдет значительное сокращение расходов, особенно резко при производстве компьютеров. Стоимость компьютера одного уровня снижалась примерно в 10 раз каждые семь лет с 1940-х годов. В общей сложности в миллион раз. Если бы автомобильные технологии делали то же самое, роскошный автомобиль теперь стоил бы меньше одного цента. (Персональные компьютерные системы по-прежнему стоят сотни долларов, поскольку они гораздо мощнее, чем гигантские машины 1940-х годов, и потому, что стоимость покупки любой полезной компьютерной системы включает в себя не только стоимость чистого компьютерного чипа, но и многое другое).

Затраты: первая оценка

Некоторые затраты относятся к выпуску всего вида продукции, независимо от того, сколько копий продукта сделано: это оплата проектирования и лицензирования технологий, нормативные затраты на утверждение и тому подобное. Другие относятся к изготовлению каждой единицы продукта: они включают оплату рабочей силы, энергии, сырья, производственного оборудования, аренды помещения, страхования и утилизации отходов. Стоимость продукции может быть очень низкой, если объем производства велик. Если затраты остаются высокими, то только потому, что люди предпочитают новые продукты, превосходящие по своим параметрам старые образцы, несмотря на высокую стоимость — вряд ли это повод для жалоб.

Более очевидными и простыми для анализа являются затраты на единицу продукции. Здесь следует вспомнить «Desert Rose Industries», где молекулярная техника выполняет большую часть работы, и где конечный продукт собирают из деталей, которые изготавливаются из простых химических веществ. Давайте рассмотрим некоторые компоненты стоимости.

Энергия

Производство на молекулярном уровне не должно потреблять много энергии. Заводы ежегодно производят миллиарды тонн обычных изделий, используя доступную солнечную энергию. Молекулярное производство может быть эффективным, если

энергия, необходимая для создания деталей продукта, будет сопоставима с энергией, выделяемой при сжигании эквивалентной массы древесины или угля. Если бы это была электроэнергия, поставляемая по сегодняшним ценам, затраты на производство энергии составляли бы что-то вроде доллара за килограмм. Мы вернемся к стоимости энергии позже.

Сырье

Молекулярное производство не будет нуждаться в экзотических материалах. Хватит простых химикатов, и это означает, что материалы не будут дороже, чем топливо и сырье, которые на данный момент получают из нефти и биомассы — бензин, метанол, аммиак и водород. Они обычно стоят десятки центов за килограмм. Даже если потребуется использовать причудливые соединения, их можно получить во время производства. Редких элементов можно избежать, но они могут быть полезны в небольших количествах. Общее количество потребляемого сырья будет меньше, чем в обычных производственных процессах, потому что меньше будет потрачено впустую.

Основное оборудование и техническое обслуживание

Как мы видели в сценарии с «Desert Rose Industries», молекулярное производство может быть использовано и для создания всего оборудования, необходимого для работы. Похоже, что это оборудование — от больших резервуаров до субмикроскопических ассемблеров специального назначения — может быть достаточно долговечным и работать в течение нескольких месяцев или лет, а затем подвергаться переработке и замене. Если бы оно стоило несколько долларов за килограмм и производило многие тысячи килограммов продукции в течение срока своей службы, стоимость оборудования мало бы добавляла к стоимости продукта.

Утилизация отходов

Сегодняшние производственные отходы сбрасываются в воздух, воду и на свалки. При молекулярном производстве таких отходов не должно быть. Избыточные материалы, которые сейчас

выбрасываются в окружающую среду, могут вместо этого в процессе производства полностью переработаться или выделяться в чистом виде, готовые для использования в каком-либо другом процессе. При идеальном производстве единственными отходами были бы отдельные атомы, появляющиеся из-за плохого сочетания сырья. Большинство из этих оставшихся атомов будут обычными минералами и простыми газами, такими как кислород, который является основным «отходом» молекулярной деятельности растений. Молекулярное производство не производит никаких новых элементов — если мышьяк там появляется, он должен был поступить извне, и производство не виновато в его существовании. Впрочем, любые токсичные материалы могут быть собраны в наиболее безопасном виде, который мы выберем для утилизации. Один из вариантов — химически связать его в стабильный минерал и вернуть туда, где он был добыт.

Труд

После того, как завод заработает, он будет нуждаться в небольшом количестве человеческого труда (людям придется изменить свой образ жизни, если фабрики не станут местом для их странных развлечений). Компания «Desert Rose Industries» работала под управлением двух человек, однако, при этом она производила большое количество разнообразных товаров. Основные производственные операции на молекулярном уровне должны быть автоматизированы, так как они слишком малы для того, чтобы их выполняли люди. Другие операции довольно просты и могут быть выполнены с помощью оборудования для обработки материалов и информации.

Пространство

Даже завод по производству нанотехнологий занимает какое-то пространство. Однако он будет компактнее, чем современные производственные предприятия, и его можно будет построить в каком-нибудь отдаленном месте с недорогой землей. По сегодняшним стандартам эти расходы должны быть небольшими.

Страхование

Стоимость страховки будет зависеть от конкретных законов, но некоторые сравнения могут быть сделаны. Улучшенные датчики и сигнализация станут неотъемлемой частью продукции; это должно уменьшить опасность пожаров и краж. Выплаты страховки за некачественную продукцию должны быть снижены за счет выпуска более безопасных и качественных продуктов (вопрос о безопасности продукта будет обсуждаться в главе 12). Уровень травматизма работников будет снижен за счет сокращения человеческого труда. Тем не менее, правовая система в Соединенных Штатах демонстрирует тревожную тенденцию блокировать каждый новый риск, пусть даже небольшой, даже когда это заставляет людей продолжать страдать от старых опасностей, которые иногда бывают огромными. (Поставка лечебных вакцин оказалась под угрозой именно поэтому). Каждый раз, когда это происходит, мы убиваем анонимных людей во имя безопасности. Такое поведение повышает страховые взносы извращенным способом, и может препятствовать переходу на более безопасные технологии производства. Поскольку такие затраты могут расти или уменьшаться независимо от реального состояния развития техники и благосостояния людей, мы не можем их оценить.

Продажа, дистрибуция, обучение

Эти затраты будут зависеть от продукта: он так же распространен как картофель и прост в использовании? Или встречается редко, сложен в применении и вопросы: зачем он нужен, где его взять и как использовать, является основными вашими проблемами? Расходы на обслуживание реальны, но их следует отделять от стоимости самой вещи.

Подводя итог, молекулярное производство должно в конечном итоге привести к снижению затрат. Первоначальные затраты на разработку технологии и конкретной продукции будут значительными, но стоимость производства может быть низкой. Затраты на энергию и на материалы (в нынешних ценах) будут значительными, но не огромными. Они были указаны в расчете на килограмм конечной продукции, но нанотехнологические продукты, сделанные из превосходных материалов, часто будут весить значительно меньше привычных продукты. (Балласт, где он необходим, будет дешевым.) Стоимость оборудования, земельных участков, затраты на утилизацию отходов и трудозатраты будут низкими по самой природе новой технологии.

Затраты на проектирование, регулирование и страхование будут сильно зависеть от человеческих вкусов и не поддаются прогнозированию. Основные продукты, такие как одежда и жилье, могут стать недорогими, если мы не сделаем что-то, чтобы сделает их дорогостоящими. Поскольку стоимость создания системы повышенной безопасности падает, будет меньше причин использовать небезопасные продукты. Молекулярное производство столь же контролируемо и эффективно, как молекулярные процессы, происходящие в растениях. Его продукты могут быть такими же дешевыми, как картофель. Возможно, это звучит слишком хорошо, чтобы быть правдой (и, как мы обсудим, конечно, есть и недостатки), но почему это не должно быть правдой? Разве мы не должны ожидать больших изменений с заменой современных технологий?

Цикл снижения затрат

Приведенная выше оценка сделала консервативное предположение о будущих затратах: энергия и материалы будут стоить столько же, сколько стоят сейчас, до того, как молекулярное производство стало доступным. Они не будут расти, потому что более низкие затраты на энергию и материалы приводят к снижению затрат на изготовление конечной продукции.

Скажем, для производства одного килограмма продукта молекулярным производством требуется заплатить один доллар за килограмм сырья и четыре доллара за щедрые сорок киловатт-часов энергии. Это типичные современные цены на материалы и электроэнергию. Предположим, что на данный момент, другие расходы невелики. Одним из полученных продуктов по пять долларов за килограмм может быть краска, содержащая солнечные элементы, пригодная для нанесения на асфальтированные дороги. Слой краски толщиной в несколько миллионных долей метра будет стоить около пяти центов за квадратный метр, а также будет производить достаточно энергии, чтобы сделать еще один квадратный метр краски менее чем за неделю, даже с учетом ночного времени и умеренного облачного покрова. Таким образом, так называемое время окупаемости энергии будет коротким.

Давайте предположим, что умная краска стоит столько же, сколько и ее распространение, и что мы требуем, чтобы она окупалась в течение одного месяца, поэтому мы взимаем десять центов за квадратный метр в месяц. При такой стоимости

стоимость солнечной энергии от наружных дорог будет составлять примерно 0,004 доллара США за киловатт-час, что в двадцать раз меньше предполагаемой стоимости энергии в первоначальной оценке производственных затрат. Само по себе это приводит к тому, что себестоимость продукции становится меньше. Большую часть оставшейся цены составляет стоимость материалов.

Но продукты нанотехнологий будут в основном состоять из углерода (если нынешние ожидания сбудутся), а двуокиси углерода в атмосфере в наши дни слишком много. При такой дешевой энергии атмосфера может быть использована в качестве источника углерода (а также водорода, азота и кислорода). Цена на углерод будет составлять несколько центов за килограмм — примерно в двадцать раз меньше первоначальной цены, предполагаемой для сырья.

Но если и энергоносители, и сырье стоят в двадцать раз меньше первоначальной цены, то и продукция станет дешевле, в том числе производящая энергию, и сырье (очищающие атмосферу)….

Вышеприведенный сценарий прост, но в общих чертах кажется реалистичным: более низкие затраты на энергию и материалы могут привести к снижению затрат. Трудно точно оценить, насколько далеко может зайти этот процесс, но он действительно может пойти далеко.

Слишком дешевая энергия?

Этот аргумент будет напоминать некоторым читателям старое утверждение о том, что ядерная энергия приведет к появлению «слишком дешевой энергии, которую нет смысла измерять». Это утверждение, относящееся к ранней ядерной эпохе, перешло в фольклор как предупреждение скептически относиться к технологам, обещающим бесплатные вкусности. Применимо ли предупреждение в нашем случае?

Тот, кто заявляет, что что-то достается бесплатно, на самом деле не понимает, как работает экономика. Использование чего-либо всегда имеет стоимость, равную наиболее ценному альтернативному использованию вещи. Выбор одной альтернативы жертвует другой, и эта жертва является ценой. Как говорит экономист Филипп К. Салин: «Нет такой возможности, как бесплатная возможность», поскольку возможности всегда стоят (по крайней мере) времени и внимания. Нанотехнологии не будут означать бесплатные вкусности.

Сейчас стало понятно, что ядерная энергия никогда не была дешевой. Но если в то время комментаторы могли ошибаться, зачем верить подобному аргументу сегодня? Мы рады сообщить, что аргументы не похожи: любой аргумент в пользу «ядерной энергии, слишком дешевой, чтобы был смысл ее измерять» абсурден даже с учетом того времени, а наш аргумент — нет.

Ядерные реакторы нагревают воду, превращая ее в пар. Он направляется в турбины, вращая генераторы. Полученный электрический ток по линиям электропередач поступает на трансформаторы, местные линии электропередач, дома, фабрики и т. Самый дикий оптимист никогда не мог бы утверждать, что ядерная энергия является свободным источником чего-то большего, чем тепло, а реалист добавил бы к цене стоимость реакторов, топлива, утилизации отходов, опасностей и всего остального. Даже наш дикий оптимист должен был бы включить в стоимость строительство котлов, турбин, генераторов, линий электропередач и трансформаторов, а также расходы на техническое обслуживание всей системы. Известно, что эти расходы составляют основную часть стоимости электроэнергии, поэтому бесплатное тепло не означало бы бесплатную электроэнергию. Таким образом, заявление о «бесплатности энергии» было абсурдным уже тогда, когда оно было сделано.

В начале 1960-х годов Элвин Вайнберг, глава Национальной лаборатории Ок-Риджа, был активным сторонником ядерной энергетики и утверждал, что она обеспечит «дешевую энергию». Он был оптимистом, основываясь на своих расчетах. Во-первых, он предположил, что атомные электростанции могут быть построены немного дешевле, чем угольные электростанции такого же размера. Затем он предположил, что стоимость топлива, удаления отходов, эксплуатации и технического обслуживания для атомных станций будет не намного больше, чем стоимость эксплуатации и технического обслуживания угольных электростанций. Затем он предположил, что они могут функционировать более тридцати лет. Наконец, он предположил, что они будут публично эксплуатироваться, не облагаться налогом или этот процент будет низким (что просто переносит затраты в другое место) и что через тридцать лет стоимость оборудования будет списана (что является фикцией бухгалтерского учета). При этом он получил стоимость электроэнергии, которая «могла бы» составлять всего лишь половину стоимости самой дешевой угольной электростанции, которую он упоминает. Он явно был оптимистом, но никогда не заявлял об энергии, слишком дешевой, чтобы был смысл ее измерять.

Низкие, но не нулевые затраты

Люди раньше кричали: «Волк!» о новых технологиях, ведущих к абсолютному изобилию. Это было сказано о ядерной энергии, а раньше о паровой энергии и, возможно, о водяных колесах, лошади, плуге и каменном топоре. Молекулярное производство отличается тем, что это новый способ сделать практически все, в том числе больше оборудования, необходимого для производства. Никогда раньше не было ничего подобного.

Основной аргумент в пользу низкой себестоимости производства заключается в следующем: молекулярное производство сможет производить практически все с минимальными затратами труда, земли или технического обслуживания, высокой производительностью и скромными требованиями к материалам и энергии. Его изделия сами по себе будут чрезвычайно эффективными в качестве производителей энергии, поставщиков материалов и производственного оборудования. Никогда еще не было технологий с таким сочетанием характеристик, поэтому исторические аналогии следует использовать с осторожностью. Возможно, лучшая из них такова: молекулярное производство сможет обрабатывать вещество, как компьютер обрабатывает информацию.

Всегда будут появляться неучтенные затраты, потому что ресурсы — будь то энергия, вещество или навыки проектирования — всегда имеют какое-то альтернативное использование. Затраты не упадут до нуля, но кажется, что они действительно могут упасть очень низко.

Глава 8
Основные сведения и многое другое

У голодных, бездомных и охотников мало времени или сил, чтобы посвятить их человеческим отношениям или личному развитию. Еда, жилье и безопасность — это еще не все, что нужно человеку, но это базовые потребности. Материальное изобилие, пожалуй, самый известный способ вызвать презрение к стяжательству и позаботиться о чем-то другом. Давайте с этой точки зрения, еще раз подумаем, как обеспечить бедных сегодня людей базовыми материальными благами.

Идея обеспечить всем людям в мире достойный уровень жизни сегодня выглядит утопией. Бедных в мире много, а богатых мало, и все же ресурсы Земли уже истощены нашими грубыми промышленными и сельскохозяйственными технологиями. Уже в 1970-х и 1980-х годах люди стали осознавать пагубность загрязнения окружающей среды и варварского воздействия на нее. Большинство смирилось с неизбежным падением уровня жизни. Лишь немногие позволяют себе мечтать о мире, в котором материальное благосостояние будет расти, потому что это кажется невозможным. Любая подобная дискуссия неизбежно будет напоминать подобные разговоры 1950-х или 1960-х годов: ну и дела, у нас скоро появятся суперкары и наступит лучшая жизнь, когда химия достаточно разовьется!

В долгосрочной перспективе, если рост населения не будет ограничен, невозможно будет поддерживать достойный уровень жизни для всех. Это известный факт, и игнорировать его — значит разрушить наше будущее. И все же мы видим, что наступает время, когда материальный уровень жизни самых бедных в мире будущего может стать предметом зависти самых богатых современных людей. Ключом является эффективное и недорогое производство качественных товаров. Будет ли оно использовано для достижения целей, которые мы описываем? Этот вопрос важнее, чем простой разговор о технологии.

В следующих двух главах, мы продолжим обсуждать, как новые технологии могут служить позитивным целям. Об этом можно много рассказать и это нужно сделать, отчасти потому, что позитивные цели могут в какой-то мере уменьшить злоупотребления. Мы просим терпения у тех читателей, которым наши рассуждения могут показаться излишне оптимистичными, и просим их поверить, что авторы разделяют их опасения по поводу злоупотреблений мощными технологиями, и того, что

позитивные цели могут закончиться гибелью человечества, что материальный рай сам по себе может таить в себе человеческие страдания. В главах 11 и 12 будут обсуждаться необходимые ограничения, несчастные случаи и возможные злоупотребления.

Нанотехнология третьего мира

Что касается богатства, то наименее развитые страны представляют собой самый тяжелый случай. Может ли такое передовое производство, как нанотехнология, основанное на молекулярном механизме, использоваться в странах третьего мира? Ответ должен быть — да. Сегодня сельское хозяйство является базовой экономикой стран третьего мира, а оно основано на естественных молекулярных машинах: выращивании пшеницы, риса, ямса и тому подобных продуктов.

Третьему миру не хватает оборудования и навыков. (У него также часто бывают проблемы с правительством, но это уже другая история.) Молекулярное производство может сделать оборудование достаточно недорогим для того, чтобы его могли купить бедные люди или агентства, занимающиеся гуманитарной помощью. Поскольку оно включает в себя оборудование для изготовления большого количества средств производства, потребность в них может быть уменьшена. Что касается навыков, базовое молекулярное производство не требует большого труда любого рода, освоить необходимые навыки будет несложно. По мере развития технологий большинство продуктов станет проще использовать, поскольку они будут содержать умные материалы.

Молекулярное производство позволит беднейшим странам обойти сложный и трудоемкий этап промышленной революции и производить менее дорогие и более простые в использовании продукты, чем ямс, рис, коза или буйвол. А такие изделия как дешевые суперкомпьютеры с огромными библиотеками текстов и анимации, которые можно просматривать с помощью трехмерных цветных мониторов, помогут распространять знания.

О роли нанотехнологий в оказании помощи беднейшим нациям будут думать не только первые разработчики, но и в правительственные и коммерческие лаборатории самых богатых стран, решая проблемы, волнующие людей. Но история полна непредвиденных последствий, и некоторые из них изменяли ситуацию к лучшему.

Строительство и жилье

Строительство крупных объектов является основой для решения проблем жилья и транспорта. Умные материалы могут в этом помочь.

Сегодня строительство, как и ремонт, обходятся дорого. Возведение огнестойких, торнадостойких, сейсмостойких и так далее зданий обходится дорого. Возводить высокие здания дорого. Сделать стены звукоизоляционными дорого. Строительство под землей дорого. Усилия по уменьшению заторов в городах часто приводят к высокой стоимости строительства метрополитена, которая может составлять сотни миллионов долларов за милю.

Строительные нормы и правила позволят нанотехнологиям совершить революцию в строительстве зданий. Превосходные материалы позволят легко строить высокие (или глубокие) здания, чтобы высвободить землю, а также устойчивые здания, способные выдержать сильнейшие землетрясения. Здания могут быть сделаны энергоэффективными и настолько приспособленными для использования попадающей на них солнечной энергии, что большинство из них станут производителями чистой энергии. Более того, умные материалы позволят легко создавать и модифицировать сложные конструкции, такие как стены вместе с окнами, электропроводку, сантехнику, компьютерные коммуникации и тому подобное. Для конкретного примера, демонстрирующего этот принцип, давайте представим, какими могут быть умные трубы.

Допустим, вы хотите установить раковину в углу вашей спальни. Новые материалы делают раковины практичными, и в доме, изготовленном из современных качественных материалов, достаточно просто наклеить одну из них на стену — остальные действия сантехника выполнит сама. Но это старый, построенный до технологического прорыва дом, так что установка раковины является модернизацией. Чтобы выполнить этот проект ручной работы, вы покупаете несколько коробок, заполненных недорогими трубами, тройниками, клапанами и приспособлениями различных размеров, все они такие же легкие, как деревянный шпон, и напоминают мягкую резину.

Самой большой практической проблемой будет сделать отверстия в существующих в квартире водопроводной и канализационной трубах. По одной из которых вода будет поступать, а из другой вытекать. Молекулярное производство может предоставить превосходные электроинструменты для

проделывания отверстий, а также умные краски и штукатурки для их заделывания, но некоторые детали будут зависеть от того, как построен ваш дом.

Конечно, умная система сантехники помогает. Если вы хотите провести сливную трубу через чердак, встроенные насосы обеспечат правильное течение воды. Гибкость труб значительно облегчает их прокладку по изгибам и углам. Низкое энергопотребление делает возможным использование водонагревателя для мойки, поэтому вам нужно всего лишь пустить в трубу холодную воду, чтобы получить и горячую, и холодную. Все детали соединяются так же легко, как в детском конструкторе, и кажутся хрупкими и ненадежными. Но когда вы используете их, микроскопические компоненты труб соединяются и становятся такими же прочными как сталь. А еще умная сантехника не протекает.

Если бы ваш дом был сделан из умных материалов, как и большинство домов в третьем мире в будущем, жизнь была бы проще. Используя специальный шпатель, конструкции стен можно будет переделать, словно это мягкая глина, и они постоянно будут выполнять свою строительную работу. Настроить сантехническую систему с нуля с помощью этого материала легко, более того, сложно сделать что-то неправильно. Трубы для питьевой воды не будут соединяться с трубами для канализации, поэтому питьевая вода не может быть случайно загрязнена. Дренажи не засорятся, потому что они могут чистить себя лучше, чем существующие средства. Если вы проложите достаточно труб от всего ко всему остальному, встроенные насосы обеспечат правильное направление потока воды при соответствующем давлении.

Умная сантехника является одним из примеров общей картины. Молекулярное производство может в конечном итоге производить сложные продукты по низким ценам, и они будут проще в использовании, чем современные, освобождая наше время для решения других проблем. Здания можно будет легко построить и легко перестроить. Основные удобства современного мира и многое другое отныне может быть использовано людьми для удовлетворения своих потребностей в любой точке земли.

Пища

Производство продуктов питания во всем мире опережает рост населения, но голод пока не побежден. В последние годы голод часто имеет политические корни, например, в Эфиопии, где правители стремятся подчинить своих противников. Такие проблемы выходят за рамки простого технологического решения. Чтобы избежать головной боли, мы также будем игнорировать политику программ поддержки высоких цен на фермерские товары, которые повышают цены на продукты питания, в то время как люди голодают. Все, что мы можем предложить здесь, это способ обеспечить доступ к свежим продуктам питания по более низкой цене при минимальном воздействии на окружающую среду.

На протяжении десятилетий футурологи предсказывали появление синтетических продуктов. Процесс молекулярного производства, несомненно, может обеспечить изготовление подобной пищи с низкими затратами, но это звучит не слишком аппетитно, поэтому мы проигнорируем эту идею.

Большая часть сельского хозяйства сегодня неэффективна — это настоящая экологическая катастрофа. Современное сельское хозяйство славится тем, что тратит воду и загрязняет ее синтетическими удобрениями. Гербициды и пестициды попадают в окружающую среду. Тем не менее, наибольшее влияние сельского хозяйства на окружающую среду оказывает сам факт использования земли. На американском востоке древние леса были полностью вырублены, частично для снабжения древесиной, частично для расчистки земли. Прерии Запада исчезли под плугом. Во всем мире эта тенденция продолжается. Технологии топора, огня и плуга несут главную ответственность за уничтожение сегодня дождевых лесов. Растущее население будет иметь тенденцию превращать любую продуктивную экосистему в некую сельскохозяйственную землю или пастбища, если мы позволим это.

Никакое технологическое решение не может ослабить долгосрочную проблему роста населения. Тем не менее, мы можем сократить использование земли в сельском хозяйстве, при этом увеличив поставки продовольствия. Одним из подходов является интенсивное тепличное хозяйство.

Для каждого вида растений существуют оптимальные условия выращивания, но они сильно отличаются от тех, что встречаются на большинстве сельскохозяйственных угодий в течение большей части года. Растения, растущие на открытом

воздухе, сталкиваются с насекомыми-вредителями, если они не обработаны пестицидами, и с низким уровнем питательных веществ в почве, если не добавлять удобрения. В теплицах, патрулируемых «нанофлизмами», способными уничтожать насекомых, растения будут защищены от вредителей и могут быть обеспечены питательными веществами, не загрязняя при этом грунтовые воды. Большинство растений предпочитают более высокую влажность и высокие, постоянные температуры, чем возможны на открытом воздухе. Более того, растения лучше растут при высоком содержании углекислого газа. Только теплицы могут одновременно обеспечить защиту от вредителей, достаточное количество питательных веществ, влажность, тепло и углекислый газ, не воздействуя при этом на состояние земной почвы.

Взятые вместе эти факторы имеют огромное значение для повышения производительности сельского хозяйства. Эксперименты с интенсивным тепличным сельским хозяйством, проведенные Лабораторией экологических исследований в Аризоне, показывают, что площадь в 250 квадратных метров — размером с теннисный корт — может приносить человеку достаточно пищи из года в год.

Молекулярное производство, с его недорогим и надежным оборудованием и интенсивным трудом, позволяет автоматизировать сельское хозяйство. С такими технологиями, как развертывающиеся палатки и умные материалы, которые мы описывали выше, строительство теплиц может стать недорогим. Если оценивать возможные траты стандартным образом, учитывая стоимость оборудования, затрат на рабочую силу, на материалы и т. д., то оказывается, что все они будут низкими, поэтому и продукты, выращенные в теплицах, могут быть недорогими.

Как это скажется на окружающей среде? Это означает, что человеческая раса могла бы питаться обычными, естественно выращенными, не содержащими пестицидов продуктами, в то же время, возвращая более 90 процентов современных сельскохозяйственных земель диким животным. Из щедрых пятисот квадратных метров, приходящихся на человека, населению США потребуется только 3 процента от нынешних площадей, отведенных под сельское хозяйство. 97 процентов территории освобождается для других целей или для постепенного возвращения ее в дикую природу. Когда фермеры смогут недорого выращивать высококачественные продукты питания на малой части полей, которые используются сегодня, они обнаружат больший спрос на свою землю не под кукурузное поле, а для организации парка или заповедника. Можно ожидать,

что в журналах фермерских хозяйств будут публиковаться статьи, содержащие советы о методах быстрого и эстетического восстановления лесов и лугов, а также о том, как наилучшим образом удовлетворить желания разборчивого любителя и защитника природы. Даже «бесполезная» земля станет популярной среди людей, ищущих уединения.

Экономика производства на основе ассемблеров отменит потребность в дешевых, уродливых, приземистых теплицах; единственная причина, по которой мы строим сегодня так, — это высокая стоимость любого строительства вообще. К тому же, современные теплицы страдают от вирусных и грибковых заражений, они могут уничтожать растениями так же, как и человеческий организм. Об этом будет рассказано позже. Проблема, с которой сталкиваются сегодняшние теплицы — перегрев — может быть решена с помощью теплообменников, сохраняя тем самым тщательно сбалансированную внутреннюю атмосферу. Наконец, если окажется, что небольшое ухудшение погоды улучшает вкус помидоров, это тоже можно обеспечить, так как нет никаких причин для фанатичного стремления к чистой эффективности.

Связь

Сегодня телекоммуникационные системы имеют резко ограниченную пропускную способность и требуют больших затрат для ее расширения. Молекулярное производство значительно снизит цену «железа» в телекоммуникационных комплексах — дешевле станут системы коммутации, компьютеры, телефоны и даже легендарные видеофоны. Кабели, изготовленные из качественных материалов, позволят легко устанавливать эти устройства и без труда объединять их.

Управлять ими можно будет сразу после того, как только вы сможете купить недорогие материалы, провода, напоминающие трос для воздушного змея или ленту, с их помощью систему можно будет присоединить к всемирной сети передачи данных. Любой вид этого материала может работать, как высококачественное оптическое волокно, защищенное от изгибов. При нажиме куски провода соединятся или прикрепятся к кусочку ленты. Кусочки ленты делают то же самое. Для подключения к сети достаточно подсоединить провод телефона или другого терминала передачи данных к ближайшей подключенной точке. А если вы живете в чаще тропического дождевого леса, бегите со всех ног к деревенской спутниковой связи.

Эти материалы для передачи данных включают в себя усилители, нанокомпьютеры, коммутационные узлы и все остальное, и они оснащены программным обеспечением, которое «знает», как действовать для надежной передачи данных. Если вы беспокоитесь, что линия может оборваться, бегите в три разных направления. Даже одна линия может передавать гораздо больше данных, чем все каналы телевизионного кабеля вместе взятые.

Транспорт

Чтобы быстро перемещаться, требуются транспортные средства и пространство, где они могут передвигаться. Старые мечты 1950-х годов о частных вертолетах технически можно было бы реализовать, используя недорогое, высококачественное производство и дешевую энергию. Осталось немного улучшить автопилоты и наладить управление воздушным движением, но будут ли люди действительно терпеть так много хлама, грохочущего по небу? К счастью, есть альтернатива вертолетам и строительству новых дорог.

Подземка

Под поверхностью Земли столько же места, сколько над ней. Обычно это не рассматривают всерьез, потому что там полно грязи, камней, воды под давлением и тому подобного. Копать дорого. Копать длинные, глубокие туннели еще дороже. Эти расходы, однако, в основном относятся к стоимости оборудования, материалов и энергии. Туннельные машины широко используются сегодня, и молекулярное производство может сделать их более эффективными и менее дорогими. Энергия для их эксплуатации не будет большой проблемой, и умные материалы смогут быстро выровнять стены туннеля, как будто они вырыты сами собой. Нанотехнологии откроют подземный мир.

При соблюдении осторожности создание подземного туннеля практически не повлияет на окружающую среду. Вместо твёрдой породы под поверхностью, появится скала с туннелем внутри. Порода поблизости не будет потревожена.

Туннели помогут избежать как неприятного эстетического воздействия от вида неба, заполненного шумными самолетами, так и отрицательного воздействия на окружающую среду от прокладки новых дорог. Туннели будут менее дорогими, чем дороги, и при желании их может стать даже больше, чем дорог в современном мире. К тому же, передвижение по ним будет осуществляться быстрее.

Привлекательность подземных трасс

Япония и Германия активно развивают магнитные поезда, как

это было описано в сценарии «Desert Rose Industries». Это позволяет избежать ограничений, вызванных трением стальных колес о стальные рельсы. Использование магнитного поля позволяет поезду «летать» по приспособленному пути. Магнитные поезда могут достигать скорости самолетов над поверхностью земли. А на длинных рейсах, в специальных туннелях, они могут достигать скорости космического корабля, преодолевая огромные расстояния за час или около того (и даже меньше, если пассажиры готовы выдержать существенное ускорение).

Подобные системы могут придать указателю «переход в метро» новое значение. Местные поездки будут осуществляться на высоких скоростях, но скорости междугородних будут выше, чем у «Конкорда». Благодаря сверхпроводящим электрическим системам скоростное метро будет более энергоэффективным, чем современный медленный общественный транспорт.

Отказ от вашего автомобиля

В течение десятилетий людям предлагали заменить автомобили каким-нибудь общественным транспортом, и кажется, что существенное снижение затрат (в том числе недорогая прокладка туннелей) может, наконец, сделать это осуществимым. Но перед тем как бросить машину, стоит посмотреть, как ее можно улучшить.

Молекулярное производство может сделать лучше любую вещь. Автомобили могут быть изготовлены прочнее и безопаснее, легче и эффективнее, при этом обеспечивая отличный пробег и используя чистое, недорогое топливо, возможно, получая его из аккумуляторов, питающих бесшумные электродвигатели. Нет никаких причин, по которым комфортабельный легковой автомобиль, используя аэродинамические силы, удерживающие его на дороге, должен доставлять неудобное ускорение гонщику.

Чтобы представить себе дешевый автомобиль, изготовленный с помощью молекулярного производства, перечислите сначала все привлекательные функции, о которых вы когда-либо слышали. Включая, современные саморегулирующиеся сидения и зеркала, отличные звуковые системы и специально настроенные системы рулевого управления и подвески, автоматические навигационные дисплеи, экстренное торможение и надежные сверхпрочные подушки безопасности. Теперь водителю не нужно самому регулировать положение сидений, зеркал и т. д., как это делается в некоторых современных автомобилях, наш автомобиль с интеллектуальными материалами может самостоятельно

регулировать свой размер, форму и цвет, предлагая владельцам сделать выбор, просто отвечая на вопрос: «Как должна выглядеть машина на этот раз»?

Те, кому дорог стиль солидного консерватизма и богатства, не будут ездить на таких дешевых автомобилях. Они будут рисковать своими шеями в сертифицированных старинных автомобилях, изготовленных из традиционной стали, краски и резины. Если экологические нормы позволят, автомобиль может даже иметь настоящий бензиновый двигатель, который наверняка будет снабжен причудливой системой, контролирующей выбросы с помощью нанотехнологий.

Открывая космические границы

Эффективность нашей транспортной системы сегодня заканчивается в верхних слоях атмосферы. Полет в космос по-прежнему считается «исторической миссией». Нет оснований считать, что эта ситуация сохранится, когда молекулярное производство будет освоено.

Стоимость космического полета высока, потому что космические корабли — это огромные, небезопасные машины, изготовленные в таком небольшом количестве, что можно считать их изготовление ручной сборкой. Молекулярное производство заменит сегодняшних уязвимых монстров надёжными, серийно выпускаемыми аппаратами (которые при большей эффективности не должны быть такими большими). Транспортные средства будут стоить немного, но энергия? Сегодня стоимость энергии, необходимой для вывода на орбиту килограмма полезного груза в эффективном транспортном средстве составляет менее ста долларов. Низкая стоимость транспортных средств и энергии снизит общую стоимость еще сильнее.

Когда космические полеты станут недорогими, люди увидят, что Земля всего лишь небольшая часть мира и на личном опыте поймут, что космические ресурсы делают ненужной дальнейшую эксплуатацию земных недр. В конечном счете, эффективное, чистое и недорогое производство может изменить отношение людей к своему существованию на Земле. Даже люди, сидящие дома, смогут существенно исправить ущерб, нанесенный ими окружающей среде.

Глава 9
Восстановление окружающей среды

В 1970-е годы, на Западе, отношение к окружающей среде изменилось революционным образом. Беспокойство по поводу загрязнения природы, вырубки лесов и исчезновения отдельных видов животных приняло невиданные масштабы. Это вызвало двойственное отношение к технологиям и богатству, которое они производили: некоторые активисты заявляли, что люди наносят ущерб окружающей среде тем сильнее, чем больше их могущество. Был сделан вывод, что технологии и стремление к более высокому уровню жизни — это что-то плохое, разрушительное по своей сути. «Богатство» и разрушение окружающей среды стали синонимами.

Революция в отношении к окружающей среде изменила представление о богатстве. Наша национальная статистика может не отражать это — далеко не каждый гражданин или политик с этим согласится. Но представление о том, что подлинное богатство включает в себя не только дома и холодильники, фабрики и машины, автомобили и дороги, но также поля и леса, сов и волков, чистый воздух, чистую воду и пустыни, глубоко укоренились в умах и политике. Понятие «богатство природы» стало включать в себя природу как ценность саму по себе, а не только как потенциальную древесину, руду и сельскохозяйственные угодья.

Как следствие, большее богатство стало означать более чистое богатство, более зеленое богатство. Самые богатые страны могут позволить себе дорогое и эффективное оборудование для очистки — скрубберы для дымовых труб, каталитические нейтрализаторы на автомобилях — и поэтому они могут производить товары с меньшим вредом для окружающей среды. Эта тенденция дает в лучшем случае намек на лучшее будущее.

Лестер Милбрат, директор Исследовательской программы по окружающей среде и обществу в Государственном университете Нью-Йорка в Буффало, отмечает: «Нанотехнологии обладают потенциалом для производства массовых потребительских товаров с гораздо более низким расходом материалов и гораздо меньшим количеством отходов, что снижает накопление диоксида углерода и уменьшает риск глобального потепления. Они позволяют сократить отходы, особенно опасные отходы, превратив их в природные материалы, которые не угрожают жизни».

Джеймс Лавлок утверждает, что «будущее может быть лучшим, если мы правильно поставим цель и займемся новыми отраслями промышленности, основанными на обработке информации и нанотехнологиях, поскольку они уделяют огромное внимание частицам молекулярного размера и не несут угрозы для окружающей среды, в то время как в прошлом производство приводило к сильному загрязнению».

Облегчить очистку

Должны ли мы гордиться высокими технологиями, в то время как промышленность все еще не может обходиться без загрязнения? Загрязнение является признаком низкой технологии и недостаточного контроля над тем, как обрабатывается сырье. Некачественные товары и опасные отходы — две стороны одной проблемы.

Благодаря процессам, основанным на молекулярном производстве, отрасли будут выпускать качественные товары, а благодаря одновременному прогрессу в управлении, им не нужно будет сжигать, смазывать маслом, промывать растворителями и кислотами и сбрасывать вредные химические вещества в канализацию. Молекулярно-производственные процессы группируют атомы контролируемыми способами и могут аккуратно собирать любые нежелательные атомы для переработки или возврата к местам их добычи. Эта внутренняя чистота вдохновила защитника окружающей среды Теренса МакКенну, который написал в «Обзоре всей земли», что нанотехнологию следует назвать «самой радикальной из зеленых концепций».

Эти зеленые мечты не будут исполнены автоматически, для этого придется потрудиться. Любая значительная технология может быть использована для чего-то хорошего или плохого, и нанотехнологии не являются исключением. Сегодня мы наблюдаем несомненный прогресс в очистке и восстановлении окружающей среды, а также некоторое замедление разрушительного воздействия на экологию из-за организованного политического давления, вызванного серьезной общественной озабоченностью. Тем не менее, несмотря на всю свою силу, это давление распространяется медленно, борясь с огромным сопротивлением промышленных компаний.

Но если эти экономические причины исчезнут, ослабнет и сопротивление. Зачастую ключом к успеху в бою является предоставление противникам привлекательной альтернативы бою. Самый сильный довод антизеленой оппозиции состоит в том, что использование недр и загрязнение земли — это единственный путь к богатству, единственный выход из нищеты. Теперь мы видим ясную, эффективную и ненавязчивую альтернативу: зеленое богатство, совместимое с природным богатством.

Прекращение химического загрязнения, сокращение потребления ресурсов

Мы уже видели, как молекулярное производство может обеспечить получение чистой солнечной энергии без вредного воздействия на экосистемы пустыни, и как чистая энергия и обычные материалы могут превращаться в массовые, эффективные товары, в том числе и экологически чистые. Если действовать осмотрительно, источники химического загрязнения — даже избыток углекислого газа — можно постепенно ликвидировать. Включая, вредные вещества, ответственные за кислотные дожди и разрушение озонового слоя, а также парниковые газы, разливы нефти и токсичные отходы.

В каждом случае ситуация примерно одинакова. Кислотный дождь в основном возникает в результате сжигания грязного топлива, содержащего серу, а также в результате сжигания более чистого топлива грязным способом с образованием оксидов азота. Мы видели, как молекулярное производство может изготовить солнечные элементы достаточно дешевыми и достаточно прочными для использования в качестве дорожных покрытий. Обладая зеленой технологией, мы можем производить чистое топливо из солнечной энергии, воздуха и воды; потребление этого топлива в чистых наномеханических системах просто вернет в воздух именно те материалы, которые из него изъяты, вместе с небольшим количеством водяного пара. И вот топливо произведено, топливо потреблено, но это не привело к загрязнению. Дешевая солнечная энергия может заменить уголь и нефть, то есть можно будет обойтись без них, и, следовательно, прекратить их добычу. Когда нефть перестанут использовать, катастрофические разливы нефти прекратятся.

Парниковый газ, вызывающий наибольшую обеспокоенность, — это углекислый газ, а его основным источником является сжигание ископаемого топлива. Вышеуказанные шаги положат этому конец. Выделение других газов, таких как хлорфторуглероды (ХФУ), используемые в пенообразующих пластмассах, часто является побочным эффектом примитивных производственных процессов: вспенивание пластмасс вряд ли будет популярным видом деятельности в эпоху молекулярного производства. Эти материалы можно заменить или контролировать, поскольку при их производстве выделяются наиболее ответственные за истощение озонового слоя газы.

Основными угрозами для озонового слоя являются те же ХФУ, которые используются в качестве хладагентов и растворителей. Молекулярное производство будет экономно использовать растворители (в основном воду) и сможет очищать их, чтобы использовать многократно. Хладагенты на основе ХФУ могут быть заменены даже с использованием современных технологий, причем по приемлемой цене; с нанотехнологиями она станет еще меньше.

Токсичные отходы обычно состоят из безвредных атомов, сгруппированных во вредные молекулы. То же самое верно и для сточных вод. С недорогой энергией и оборудованием, способным работать на молекулярном уровне, эти отходы могут быть преобразованы в безвредные формы. Многие не нуждаются в специальной обработке. Но некоторые отходы содержат токсичные элементы: свинец, ртуть, мышьяк и кадмий. Они поступают вместе с сырьем и лучшее, что можно с ними сделать — вернуть в те месторождения, откуда они были добыты. Более того, использование нанотехнологий сделает их использование не нужным. Нанотехнологии смогут разбивать материалы на простые молекулы и восстанавливать их снова. Нужно ли говорить, что это позволит осуществить полную переработку?

Следует сказать, что устранение этих источников загрязнения было бы серьезным улучшением ситуации с экологией. Похоже, что нельзя сказать что-то против, кроме обычных предостережений: «Не сразу», «Не все сразу» и «Сроки развития предсказать нельзя». Никто не хочет производить и при этом множить отходы; все хотят изготавливать что-то полезное, однако без отходов пока обойтись нельзя. Если появится лучший способ получить то, что хотят люди, свалка отходов станет ненужной.

Люди все равно смогут получить то, что они хотят, при этом сокращая потребление ресурсов. Поскольку материалы становятся более прочными, они могут использоваться экономнее. По мере совершенствования машин — их двигателей, подшипников, изоляции, компьютеров — они будут становиться эффективнее. Материалы и энергия по-прежнему будут необходимы для производства вещей, но в меньших количествах. Более того, нанотехнологии станут самой совершенной технологией переработки. Объекты могут быть сделаны чрезвычайно долговечными, уменьшая потребность в переработке. Кроме того, разработанные на молекулярном уровне объекты могут быть по-настоящему биоразлагаемыми и самоуничтожаться сразу после использования, оставляя гумус и минеральную крошку. В качестве альтернативы они могут быть изготовлены из микроскопических соединяющихся деталей, что

делает их пригодными для повторного использования, как в детском конструкторе. Наконец, даже объекты, не предназначенные для переработки, могут быть разобраны на простые молекулы и переработаны отдельно. Каждый подход имеет свои преимущества и затраты, и каждый из них устраняет текущие проблемы с мусором.

Очистка наследия двадцатого века

Тем не менее, даже после того, как индустрия двадцатого века станет историей, ее токсичные отходы останутся. Очистка свалок с помощью современных технологий оказалась настолько дорогой и неэффективной, что многие почти потеряли надежду на реальное решение этой проблемы. Что можно сделать после технологического прорыва?

Очистка почвы и воды

Нанотехнологии помогут очистить почву и воду. Как и живые организмы, которые, когда могут, очищают окружающую среду, используя молекулярные механизмы для разложения токсичных веществ. Системы, построенные с использованием нанотехнологий, смогут делать то же самое, в том числе с соединениями, которые не являются биоразлагаемыми.

Алан Лисс — директор по исследованиям в «Ecological Engineering Associates», компании, которая исследует то, как функционируют природные экосистемы для решения экологических проблем, таких как очистка сточных вод. Он объясняет, как может осуществляться очистка: «Чем больше мы узнаем об экосистеме, тем больше понимаем, что ее функционирование управляется определенными организмами или группами организмов. Нанотехнологические «менеджеры» должны вмешаться, когда естественные способы очистки не работают, таким образом, будет выполнена определенная экологическая деятельность, которой в противном случае не было бы. Нанотехнологического «менеджера» будут использовать для восстановления в ситуации, когда токсические вещества уничтожили некоторых ключевых членов определенной экосистемы — например, некоторые важные микробы. Вновь возникшие и выжившие в стрессовой экосистеме организмы могут подключиться и продолжить усилия по восстановлению экосистемы».

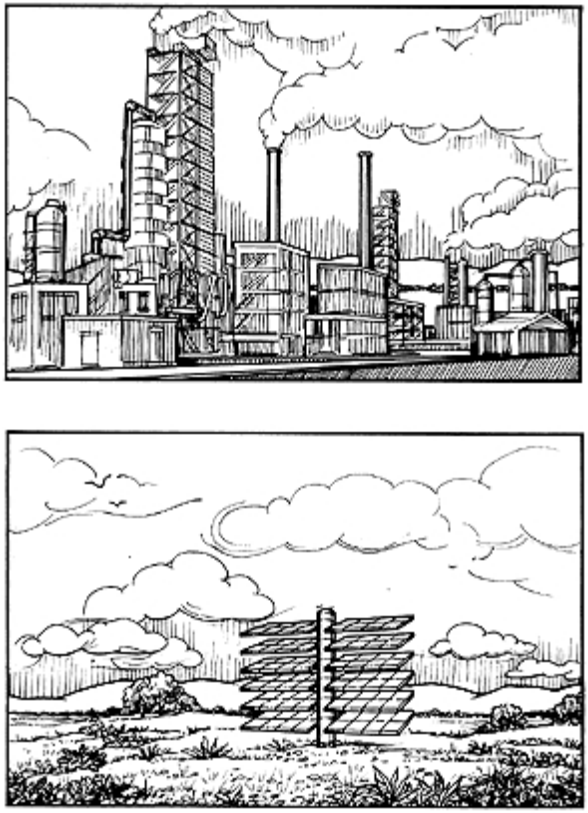


Рисунок 10. ОЧИСТКА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Изменяя способ производства материалов и продуктов, молекулярное производство освободит земли, ранее использовавшиеся для промышленных предприятий. Токсичные вещества могут быть удалены из загрязненной почвы с использованием солнечной энергии, а устройство для очистки и любые собранные отходы могут быть впоследствии вывезены.

Чтобы понять, как можно использовать наномашины для очистки от загрязнений, представьте себе устройство, сделанное из умных материалов, которое после того, как доставлено и развернуто, напоминает дерево. Над землей находятся солнечные коллекторы; под землей разветвленная система корневых трубок, глубоко уходящая в почву. Внедряясь в свалку токсичных отходов, эти корнеобразные структуры могут впитывать токсичные химические вещества, используя энергию солнечных коллекторов для превращения их в безвредные соединения. Корнеподобные сооружения, простирающиеся вниз до уровня грунтовых вод, могут выполнять очистку загрязненных водоносных горизонтов.

Очищение атмосферы

Большая часть грязи из атмосферы быстро вымывается дождем (превращая ее в проблемы загрязнения почвы и воды), но некоторые загрязнители воздуха сохраняются дольше. Среди них соединения хлора, атакующие озоновый слой, который защищает Землю от чрезмерного ультрафиолетового излучения. С 1975 года наблюдатели регистрируют растущие дыры в озоновом слое: на Южном полюсе дыра может доходить до границ Южной Америки, Африки и Австралии. Утрата этой защиты подвергает людей повышенному риску рака кожи и оказывает неблагоприятное влияние на экосистемы. Новая технологическая база сможет остановить рост озоноразрушающих соединений, но последствия будут сохраняться годами. Как можно решить эту проблему быстрее?

До сих пор мы говорили о нанотехнологиях в лаборатории, на производственных предприятиях и в изделиях, предназначенных для непосредственного использования человеком. Молекулярное производство может также производить изделия, которые будут выполнять некоторую полезную временную функцию для защиты окружающей среды. Избавление от разрушающих озон загрязнителей высоко в стратосфере — один из примеров. Возможны и более простые подходы, без изощренности нанотехнологий, вот один из них, предназначенный для очистки стратосферы от хлора: сделайте огромное количество воздушных шаров, размером с пыльцу и достаточно легких, чтобы попасть в озоновый слой. В каждый из них поместите небольшую солнечную электростанцию, молекулярно-перерабатывающий завод и микроскопическое зерно натрия. Завод по переработке собирает хлорсодержащие соединения и выделяет хлор, который вступает в реакцию с натрием, в результате получается хлорид натрия — обычная соль. Когда натрий заканчивается, шар разрушается и падает. В конце концов, кусочек соли и биоразлагаемая крошка падают на Землю, обычно в море. Отличный способ быстро очистить стратосферу.

Более серьезная проблема (требующая наземного решения) — климатические изменения, вызванные повышением уровня углекислого газа (CO_2). Глобальное потепление, ожидаемое большинством климатологов и, вероятно, происходящее сегодня, вызвано изменениями в составе земной атмосферы. Солнце светит на Землю, греет ее. Земля излучает тепло обратно в космос, охлаждая поверхность. Скорость, с которой она охлаждается, зависит от того, насколько прозрачна атмосфера для излучения тепла. Тенденция атмосферы удерживать тепло,

препятствовать выходу теплового излучения в космос, вызывает так называемый «парниковый эффект». Этому способствуют несколько газов, но CO_2 представляет собой наиболее серьезную проблему. Главный вклад вносят ископаемое топливо и вырубка лесов. До появления новой технологической базы в атмосферу, вероятно, будет добавлено около 300 миллиардов тонн избыточного CO_2.

Небольшие теплицы могут помочь обратить вспять глобальный парниковый эффект. Развивая более эффективное сельское хозяйство, молекулярное производство может освободить землю для лесовосстановления, помогая восстановить урон зеленым насаждениям, который был вызван борьбой с голодом. Растущие леса поглощают CO_2.

Если лесовосстановление происходит недостаточно быстро, можно использовать недорогую солнечную энергию для непосредственного удаления CO_2, в результате чего образуется кислород и блестящая графитовая галька. Покрытие по всему миру дорог краской, содержащей солнечными батареями, даст около четырех триллионов ватт энергии, что достаточно для удаления CO_2 со скоростью 10 миллиардов тонн в год. Временное покрытие солнечными батареями одной десятой части сельскохозяйственных угодий США даст «урожай» энергии, достаточной чтобы убрать 300 миллиардов тонн CO_2 в течение пяти лет. Ветры разнесут очищенный воздух по всему миру. Урон, нанесенный атмосфере Земли в двадцатом веке, может быть устранен менее чем за десятилетие восстановительных работ двадцать первого века. Поврежденные экосистемы— это другое дело.

Орбитальный мусор

Пространство около Земли загрязнено маленькими орбитальными объектами, некоторые из которых размером с булавку. Большую часть обломков составляют фрагменты использованных ракетных ступеней, а также перчатки и камеры, потерянные астронавтами. Это проблема не связана с качеством жизни на Земле, но создает проблемы для дальнейших космических полетов, человечество начинает историческое распространение за пределами Земли — первое большое расширение пространства своего обитания после заселения континентов, которое произошло очень давно.

Орбитальные объекты движутся намного быстрее, чем пули, выпущенные из винтовки, их энергия пропорциональна квадрату

скорости. Небольшие фрагменты мусора в космосе могут нанести огромный ущерб космическому кораблю, и что еще хуже — их воздействие на космический корабль может увеличить количество мусора. Каждый фрагмент, оказавшийся на пути астронавта, для него потенциально смертелен. Сегодня крошечная часть космоса, которая находится рядом с Землей, все больше загрязняется.

Этот мусор нужно собрать. Молекулярное производство позволит построить маленький космический корабль, способный маневрировать в космосе, собирая один кусок мусора за другим. Нужны небольшие космические корабли, так как нет смысла отправлять шаттл ради куска металла размером с почтовую марку. С помощью этих устройств мы можем очистить небо и сделать его более пригодным для жизни.

Ядерные отходы

Мы говорили об отходах, которые просто нуждаются в молекулярных изменениях, чтобы сделать их безвредными, и токсичных элементах, которые были добыты под землей, но ядерные технологии создали третий вид отходов. Они превратили медленную, умеренную радиоактивность урана в быструю, интенсивную радиоактивность вновь созданных элементов, продуктов деления и возможной нейтронной бомбардировки. Никакие молекулярные изменения не могут сделать их безвредными, и они не были добыты в земле. Продукты молекулярного производства могут помочь с традиционными подходами к обращению с ядерными отходами, помогая хранить их в наиболее стабильных и надежных возможных формах, но есть более радикальное решение.

Еще до эпохи создания ядерного реактора и ядерной бомбы экспериментаторы умели искусственно создавать радиоактивные элементы, ускоряя частицы и направляя их в нерадиоактивные цели. Эти частицы мчались достаточно быстро, чтобы проникнуть внутрь атома и достичь ядра, присоединившись к нему или разбив его на части.

Вся Земля состоит из остатков ядерных реакций древних звезд. Ее радиоактивность низкая, потому что прошло много времени — много периодов полураспада для большинства радиоактивных ядер. Удар по этим стабильным ядрам часто превращает их в радиоактивные. А удар по радиоактивному ядру имеет определенный шанс вернуть его в стабильное состояние, уничтожив радиоактивность. Ударяя, сортируя и разгоняя снова, атомная машина может вырабатывать электроэнергию и собирать радиоактивные отходы, получая в результате только стабильные нерадиоактивные элементы, идентичные тем, которые распространены в природе. Не рекомендуйте это своему конгрессмену — сегодня это будет слишком дорого — но когда-нибудь это станет практичным способом уничтожать радиоактивные остатков ядерных отходов двадцатого века.

Нанотехнологии не могут сделать это напрямую, потому что молекулярные машины работают с молекулами, а не с ядрами атомов. Но косвенным образом, делая энергоносители и оборудование недорогими, молекулярное производство может дать нам средства для чистого и удобного решения проблемы радиоактивных отходов, оставшихся после ядерной эры.

Мусор как источник богатства

Нехватка часто порождает экологический ущерб. Столкнувшись с нехваткой продовольствия, пастухи могут продолжать пасти свои стада до полного исчезновения травы на лугу. В условиях нехватки энергии промышленно развитые страны могут одобрять разрушительные проекты. Рост населения и потребление ресурсов промышленностью двадцатого века оказывают все большее давление на способность Земли поддерживать привычный уровень потребления.

Проблема ресурсов будет выглядеть совсем иначе в XXI веке, когда появится новая технологическая база. Сегодня мы рубим деревья и добываем железо для наших производств. Мы добываем нефть и уголь, чтобы обеспечить себя энергией. Даже цемент рождается в пламени горящего ископаемого топлива. Почти все, что мы строим, почти каждое движение, которое мы делаем, потребляет что-то оторванное от Земли. Это не должно продолжаться.

Наша цивилизация использует материалы для многих целей, но главным образом для изготовления вещей определенного размера, формы и прочности. Так производят все, от тканей для одежды до покрытия дорог, и большую часть мебели, стен, автомобилей, космических кораблей, компьютеров — в действительности, большую часть почти каждого продукта, который мы производим и используем. Лучшие конструкционные материалы используют углерод в таких формах как алмаз и графит. С элементами из воздуха и воды углерод составляет полимеры шерсти и полиэстера, а также дерева и нейлона. Цивилизация XXI века может добывать углерод из атмосферы, более 300 миллиардов тонн, что позволит снизить концентрацию CO_2 до естественного доиндустриального уровня. Для 10-миллиардного населения этого было бы достаточно, чтобы дать каждой семье большой дом с легкими, но крепкими стенами. Атмосферный мусор является достаточным источником строительных материалов, без необходимости рубить деревья или добывать железную руду.

Растения показывают, что углерод может быть использован для создания солнечных батарей. Лабораторные работы показывают, что соединения углерода могут быть лучшими проводниками, чем медь. Можно построить целую энергосистему, даже не привлекая богатые ресурсы металла, захороненные на мусорных свалках.

Из углерода в виде пластика или алмаза можно сделать окна.

Органические красители, содержащие углерод, могут сделать вещи красивыми. Углерод может быть использован для создания нанокомпьютеров, и, конечно, станет главным компонентом высокопроизводительных наномашин всех видов. Другими компонентами являются водород, азот и кислород, содержащиеся в воздухе и воде. Остальные элементы понадобятся в меньших количествах. Часто достаточно небольших добавок.

С новой технологической базой, облегчающей переработку, не нужно будет постоянно истощать ресурсы Земли, чтобы поддерживать цивилизацию. Только что сделанный прогноз показывает, что рециркуляция только одной формы мусора — избытка атмосферного CO_2 — может удовлетворить большинство потребностей. Даже 10 миллиардам богатых людей не нужно будет лишать Землю ресурсов. Им будет достаточно того, что мы уже добыли и отправили на свалку, и даже этого много.

Короче говоря, цивилизация двадцать первого века с населением в 10 миллиардов человек сможет поддерживать высокий уровень жизни, используя только отходы промышленного производства двадцатого века, дополненные скромным количеством воздуха, воды и солнечного света. Это не обязательно произойдет, но сам факт того, что это возможно, дает лучшее представление о том, что может означать новая технологическая база для отношений между человечеством, ресурсами и Землей.

Зеленые продукты

В «Зеленом потребителе» Элкингтон, Хейлс и Маковер определяют зеленый продукт как продукт, который:

— не опасен для здоровья людей или животных;

— не наносит вреда окружающей среде при производстве, использовании или утилизации;

— не потребляет лишней энергии и других ресурсов при производстве, использовании или утилизации;

— не увеличивает ненужных отходов из-за чрезмерной упаковки или короткого срока службы;

— не связан с ненужным использованием или жестоким обращением с животными;

— не использует материалы, полученные из видов, которым грозит вымирание, или вредящие окружающей среде;

— в идеале не ставит цену, качество, питание или удобство выше состояния окружающей среды.

Обладая способностью производить практически все необходимое по низкой цене, включая продукты, разработанные для обеспечения безопасности, долговечности, эффективности, отказавшись от добычи полезных ископаемых, лесозаготовок, нанесения вреда животным и окружающей среде и производства токсичных отходов, молекулярное производство сделает возможным производство более экологически чистых продуктов, чем все известные до сих пор. Нанотехнологии могут заменить грязное богатство зеленым богатством.

Восстановление окружающей среды

Центральная проблема в восстановлении окружающей среды — изменение экологических требований. Мы видим, что для жилья необходим определенный участок земли, потому что только там можно построить дом. Сельское хозяйство, однако, занимает больше земли, а вариант сельского хозяйства, называемый «лесное хозяйство», требует еще больше. Отказавшись от наших потребностей в сельскохозяйственных угодьях, а также в древесине и бумаге, нанотехнологии могут изменить баланс сил, стоящих за нарушением окружающей среды. Это должно сделать более практичным, политически и экономически, стремление людей к восстановлению окружающей среды.

Восстановление окружающей среды означает возвращение земли к тому состоянию, которое было у нее первоначально — удаление того, что было добавлено, и, где это возможно, замена того, что было потеряно. Мы видели, как это можно сделать, частично удаляя загрязняющие вещества и некоторые факторы воздействия на землю при вспашке и укладке дорожного покрытия. Однако более сложной проблемой является восстановление экологического баланса, затрагивающего биологические изменения. Значительная часть биологического разнообразия Земли является результатом биологической изоляции островов, морей, гор и континентов. Эта изоляция была нарушена, и решение возникающих проблем является одной из величайших проблем в исцелении биосферы.

Импортированные виды

Человеческое вмешательство в биосферу привело к огромным экологическим проблемам. Это не связано с генной инженерией, смысл которой — изменение организмов для того, чтобы они лучше служили человеческим целям. Генная инженерия обычно ослабляет их способность служить своим собственным целям, а также выживать и размножаться в дикой природе. Значительный вред экологии нанесли путешествующие по миру люди, перевозящие агрессивные, хорошо адаптирующиеся виды из одной части планеты в другую, высадив их на отдаленном острове или континенте, они подвергают экосистему, лишенную развитой защиты, враждебному вторжению. Это происходит снова и снова.

Классический случай — Австралия. Достаточно долго континент был изолирован, благодаря этому на нем появились уникальные виды живых существ, совершенно незнакомые в других местах: кенгуру, коалы, утконосы. Но прибыли люди, которые привезли с собой новые виды. Тот, кто завел первых кроликов, не мог предположить, что их воздействие на экосистему окажется столь разрушительным. Вскоре кролики, не контролируемые естественными конкурентами или хищниками, наводнили континент, уничтожая посевы и пастбища. К ним присоединились захватчики из растительного царства: опунция и другие.

Американские континенты также пострадали от вторжений: перекати-поле, проклятие скотоводов и фермеров, является относительно недавним ввозом из Центральной Азии. С 1956 года африканские пчелы распространяются из Бразилии и двигаются на север, но в Америке их вытесняют европейские пчелы. В Африку, в свою очередь, вторгается американская муха-червяк, насекомое с личинками, которые проникают в раны животного, включая пупочную рану новорожденного, и поедают их заживо. История продолжается и продолжается.

Иногда люди с некоторой долей успеха пытаются бороться с огнем с помощью огня: они завозят естественных врагов чужеродных видов или заражают их болезнетворными бактериями, чтобы удержать их рост в разумных пределах. Проблема Австралии с опунцией была решена с помощью насекомого из Аргентины; кролики были побеждены — с неоднозначными результатами — с помощью вирусной болезни, называемой миксоматозом: «оспой кроликов».

Защитники экосистем

Во многих частях мира местные виды были уничтожены крысами, свиньями и другими привезенными видами, а другие находятся под угрозой исчезновения и борются за свою жизнь. Биологический контроль — борьба с огнем с помощью огня — имеет свои преимущества: используются маленькие организмы, действуют они избирательно и стоят недорого. Эти преимущества будут в конечном итоге достигнуты и с помощью устройств, созданных с использованием молекулярного производства, которые позволят устранить проблемы с завезенными видами и не потребуют привлечения еще более неконтролируемых, размножающихся и распространяющихся видов. Алан Лисс говорил об использовании нанотехнологических устройств для восстановления экосистем на химическом уровне. Подобная идея может быть применена и на биологическом уровне.

Задача — и она очень сложная — заключалась бы в разработке устройств размером с насекомое или даже с микроб, которые могли бы действовать выборочно, были бы мобильными механическими мухобойками или искоренителями сорняков. Они должны делать то, что делают биологические средства борьбы, но не могли бы размножаться и распространяться. Давайте назовем устройства такого рода «защитниками экосистем». Они могли бы бороться с агрессивными чужеродными видами, спасая местные виды от вымирания.

Человеку или обычному организму защитник экосистемы может показаться просто еще одним из множества миллиардов различных видов насекомых и микробов, обитающих в экосистеме — мелочью, занимающейся собственными делами, и не собирающейся кусаться. Их можно было бы обнаружить, но только если взять пробы грязи и рассматривать их в микроскоп. Защитников экологии будет не очень много. У них была бы только одна цель: приступить к работе, когда они натолкнутся на чужеродный организм, отмеченный в списке «здесь не приветствуется», а затем либо устранить его, либо обеспечить, по крайней мере, невозможность его размножения.

Природные организмы часто очень разборчивы к тому, какие виды они атакуют. Защитники экосистемы могут точно так же выбирать, к какому виду приближаться, и затем, перед атакой, могут провести анализ ДНК, чтобы быть уверенным в выборе цели. Было бы проще (особенно в начале, пока мы еще учимся) ограничивать каждый вид защитника мониторингом только одного чужеродного вида.

Устройство защитника экосистемы конкретного типа будет изготовлено стандартно и точно с помощью специальной установки для молекулярного производства. Каждое из них будет действовать определенное время, а затем выйдет из строя. Каждое может быть испытано в террариуме, затем в теплице, а затем в пробной экосистеме на открытом воздухе, контролируя их поведение на каждом этапе, пока не появится уверенность в том, что можно переходить к большим масштабам. «Большие масштабы» могут быть весьма ограниченными, если они не предназначены для далеких путешествий. Встроенное устаревание ограничивает как длительность работы каждого устройства, так и дальность его перемещения: контроль над структурой вещества включает в себя работу наномашин только там, где они нужны.

Сельскохозяйственная отрасль сегодня производит и использует многие тысячи тонн ядовитых химикатов для опрыскивания почвы, обычно для того, чтобы уничтожить один или несколько видов насекомых. Защитники экосистемы могут также использоваться для защиты сельскохозяйственных монокультур, поле за полем, с гораздо меньшим ущербом для окружающей среды. Они также могут быть использованы в особых экосистемах интенсивного тепличного земледелия.

В отличие от химикатов, распыляемых в окружающую среду, деятельность этих защитников экосистем будет строго ограничена по времени, пространству и воздействию. Они не загрязнят грунтовые воды, не отравят пчел и божьих коровок. Чтобы отсеять чужеродные организмы и вернуть экосистему к ее естественному балансу, защитников экосистемы не должно быть очень много — достаточно, чтобы типичный чужеродный организм встречался с ними один раз, перед размножением.

Тем не менее, поскольку защитники экосистем выходят из строя и перестают работать, возникает небольшая проблема с утилизацией твердых отходов. При использовании некоторой продуманной конструкции весь механизм защиты экосистем может быть сделан из достаточно прочных, но биоразлагаемых материалов или (в худшем случае) материалов, не более вредных, чем куски песка и гумуса в почве. Таким образом, их останки будут похожи на раковины диатомовых водорослей, или кусочки лигнина, или на частицы глины или песка.

В крайнем случае, мы могли бы разработать другие мобильные наномашины, которые бы отыскивали, собирали и уничтожали эти останки. Эта стратегия начинает выглядеть как создание параллельной экосистемы мобильных машин, процесс, который можно расширить, чтобы во многих отношениях

дополнить естественные процессы очищения природы. Каждый шаг в этом направлении потребует осторожности, но не паранойи: здесь не должно быть никаких токсичных химикатов, новых существ, которые могут бесконтрольно размножаться. Большим достоинством является то, что ошибочные шаги могут быть исправлены. Если мы решим, что нам не нравятся результаты какого-либо конкретного средства защиты экосистем или машины для очистки, мы можем просто прекратить их производство. Мы могли бы даже собрать те, которые уже были изготовлены и выпущены в окружающую среду, поскольку известно их точное число и какой участок земли они контролируют.

Если создание и мониторинг защитников экосистем, по-видимому, сопряжены с большими трудностями даже только для того, чтобы просто отсеять чужеродные виды, представьте, какие разрушения окружающей среды эти виды могут вызвать. Незадолго до Второй мировой войны южноафриканский вид огненного муравья был случайно завезен в Соединенные Штаты. Сегодня на зараженных территориях может быть до пятисот этих муравьев на квадратный фут. «The National Audubon Society»— принципиальный противник безответственного использования пестицидов — вынуждено было прибегнуть к опрыскиванию своих островов-убежищ возле города Корпус-Кристи, когда они обнаружили, что эти муравьи уничтожили более половины детенышей вымирающего вида коричневого пеликана.

В Техасе было показано, что новые муравьи убивают местные виды муравьев, сокращая биоразнообразие. Сэнфорд Портер из USDA утверждает, что благодаря им «Техас может оказаться в центре подлинной биологической революции». Муравьи направились на запад и появились в Калифорнии. Без защитников экосистем или чего-то похожего на них экология во всем мире будет продолжать подвергаться угрозе неестественных вторжений. Люди открыли новые пути миграции организмов, и наша обязанность — защитить местные виды, ставшие вдруг уязвимыми.

Восстановление земли

Сегодня жизнь большинства людей не связана с землей, поскольку они заняты в промышленности 20-го века. В последующие годы ее заменят молекулярными системами, которые в большинстве своем действуют самостоятельно. Необходимости уничтожать землю будет меньше. А времени, доступного для восстановления земли, больше. Конечно, для этого потребуется использовать больше энергии.

Для восстановления разрушенных ландшафтов потребуются усилия и умение. Защитники экосистем могут выполнять работу по уничтожению мух и сорняков, с которой не могли справиться люди. Земля была очень сильно разворочена машинами, подчинявшимся поспешным действиям. Она может быть постепенно восстановлена терпеливыми руками, голыми, в перчатках или направляющими машины, способные восстановить разрушенную гору, не повредив почву.

Зеленые богатства, которые могут принести нанотехнологии, породили большие надежды у некоторых экологов. В своей статье в «Обзоре всей земли» Теренс МакКенна предполагает, что «это будет способствовать… ощущению единства и баланса природы и нашей собственной человеческой позиции в этом динамичном и развивающемся процессе». Возможно, люди научатся ценить природу больше, когда увидят ее отчетливее, потому что их глаза не будут затуманены горем и виной.

Глава 10
Наномедицина

Наши тела заполнены сложными, активными молекулярными структурами. Когда они повреждены, здоровье страдает. Современная медицина может влиять на работу организма разными способами, но с молекулярной точки зрения она действует очень грубо. Молекулярное производство должно создать целый ряд медицинских инструментов и устройств с большими возможностями. Тело — это чрезвычайно сложный мир молекул. С помощью нанотехнологий мы научимся их ремонтировать.

Молекулярное тело

Чтобы понять, что нанотехнологии могут сделать для медицины, нам нужно представить, как выглядит тело с молекулярной точки зрения. Человеческое тело можно рассматривать как верфь, строительную площадку и поле битвы для молекулярных машин. Оно функционирует замечательно хорошо, используя системы настолько сложные, что медицина до сих пор не понимает, как многие из них действуют. Неудивительно, что довольно часто это приводит к неудачам.

Тело как мастерская

Молекулярные машины выполняют всю повседневную работу организма. Когда мы жуем и глотаем, эти движения совершаются с помощью мышц. Мышечные волокна состоят из пучков молекулярных волокон, которые сокращаются, скользя относительно друг друга.

В желудке и кишечнике молекулярные машины, которые мы называем пищеварительными ферментами, расщепляют сложные молекулы пищевых продуктов, образуя меньшие молекулы для использования в качестве топлива или в качестве строительных блоков. Молекулярные устройства в слизистой оболочке пищеварительного тракта переносят полезные молекулы в кровеносную систему.

В легких, молекулярные накопители, называемые молекулами гемоглобина, поглощают кислород. Сердце,

приводимое в действие молекулярными волокнами, перекачивает в клетки кровь, наполненную топливом и кислородом. Мышцы сокращаются, расходуя их. В мозге они управляют молекулярными насосами, которые заряжают нервные клетки необходимой энергией. В печени они управляют молекулярными машинами, которые строят и разрушают целый ряд молекул. Так можно описать всю работу тела.

Тем не менее, каждая из этих функций иногда перестает работать из-за повреждения или врожденного дефекта.

Тело как строительная площадка

Для роста, заживления и обновления тканей тело является строительной площадкой. Клетки берут строительные материалы из кровеносной системы. Молекулярный механизм, запрограммированный генами клетки, использует эти материалы для формирования костей и коллагена, для создания совершенно новых клеток, для обновления кожи и для заживления ран.

За исключением зубных пломб и других искусственных имплантатов, все в человеческом теле создается с помощью молекулярных машин. Они строят молекулы, в том числе и другие молекулярные машины. Они убирают старые или ненужные структуры, иногда используя для этого такие механизмы как пищеварительные ферменты, чья цель расщеплять сложные молекулы.

Во время создания ткани целые клетки движутся, подобно амебам: вытягиваются вперед, прикрепляются, подтягивая материал внутри себя, и освобождают прежнее место прикрепления. Отдельные клетки представляют собой активную структуру, состоящую из компонентов, которые могут быть разрушены или заменены. Некоторые молекулярные машины в клетке специализируются на уничтожении молекул, которые имеют признаки повреждения, что позволяет заменить их свежими молекулами, созданными в соответствии с генетическими программами. Компоненты внутри клеток образуют свои сложные связи за счёт самосборки, то есть за счёт прилипания к надлежащим партнёрам.

Способность восстановления уменьшается с возрастом. Зубы изнашиваются и крошатся и не заменяются; волосяные фолликулы перестают работать; на коже появляются морщины. Форма глаза становится более неподвижной, развивается дальнозоркость. Молодые тела могут быстро сращивать сломанные кости, делая их крепче, чем раньше, но остеопороз

делает старые кости настолько хрупкими, что они ломаются при небольшом нажиме.

Иногда восстановительные функции начинают выполняться, когда в этом нет необходимости из-за отсутствующего или дефектного генетического кода. При гемофилии кровотечение не прекращается из-за того, что потеряна способность свертывать кровь. Мышечная ткань нарушается у одного из 3300 мужчин при мышечной дистрофии, при которой мышцы постепенно замещаются рубцовой тканью и жиром; молекулы «дистрофин» не существует. Серповидная клеточная анемия возникает из-за излишнего количества молекул гемоглобина.

Параплегики и квадриплегики знают, что некоторые части тела плохо заживают. Повреждение спинного мозга — очень серьезный случай, к тому же в результате многих несчастных случаев неправильно срастаются ткани и появляются рубцы. Но если ткани восстановятся удачно, травма не будет источником постоянных болей.

Тело как поле битвы

Нападение на тело извне превращают его в поле битвы, где агрессоры иногда одерживают верх. Паразитические черви и простейшие, грибы, бактерии и вирусы, различные виды захватчиков научились жить, проникая в организм, и с помощью своих молекулярных механизмов используют строительные блоки организма для своего роста. Чтобы противостоять этим попыткам, тело мобилизует защитные механизмы иммунной системы — армаду своих собственных молекулярных машин. Белые кровяные тельца, похожие на амебы, патрулируют кровеносную систему и проникают в ткани между другими клетками в поисках паразитов.

Как иммунная система отличает сотни видов клеток, которые должны быть в организме, от вторгающихся клеток и вирусов, которых там не должно быть? Это центральный вопрос комплексной науки иммунологии. Ответ, пока еще только частично понятый, предполагает сложное взаимодействие молекул, с помощью которого распознаются чужие молекулы, отличая их по форме. К ним относятся свободно плавающие антитела, которые немного похожи на неуклюжие управляемые ракеты. А также подобные им молекулы, расположенные на поверхности белых кровяных телец и других клеток иммунной системы, что позволяет им распознавать чужеродные объекты при контакте.

Эта система делает нашу жизнь возможной, защищая тело от

судьбы куска мяса, оставленного при комнатной температуре. Тем не менее, в двух случаях она нас подводит.

Во-первых, иммунная система не противодействует абсолютно всем захватчикам или не всегда реагирует адекватно. У малярии, туберкулеза, герпеса и СПИДа есть свои стратегии уклонения от уничтожения. Рак — это особый случай, когда захватчики представляют собой измененные клетки самого тела, иногда успешно маскирующиеся под здоровые и избегающие таким образом обнаружения.

Во-вторых, иммунная система иногда остро реагирует, когда в этом нет необходимости, нападая на клетки, которые следует оставить в покое. Определенные виды артрита, а также волчанка и ревматическая лихорадка, вызваны этой ошибкой. Таким образом, иммунная система часто выходит из строя, вызывая страдания и смерть, атакуя клетки, без особой необходимости, и не атакуя, когда должна.

Медицина сегодня

Когда тело с ошибками работает, растет и борется, мы обращаемся к медицине для диагностики и лечения. Современные методы, тем не менее, имеют очевидные недостатки.

Грубые методы

Диагностические процедуры варьируются в широких пределах: от опроса пациента, изучения рентгеновских снимков, исследовательской хирургии и микроскопического и химического анализа материалов организма. Врачи могут диагностировать многие болезни, но некоторые остаются для них загадкой. Однако диагноз не означает, что врачи понимают, что происходит с телом: они могли диагностировать инфекции до того, как узнали о микробах, и сегодня способны диагностировать многие синдромы, вызванные неизвестными причинами. После многих лет экспериментов и многочисленных смертей людей они могут лечить даже то, чего не понимают — часто лекарство может помочь, хотя никто не знает, почему так происходит.

Хирургия — это способ лечения, связанный с прямым вмешательством в организм пациента, который осуществляется высококвалифицированными специалистами. Хирурги сшивают порванные ткани и кожу для заживления, вырезают раковые опухоли, очищают закупоренные артерии и даже устанавливают кардиостимуляторы и заменяют отказавшие органы. Однако хирургическое вмешательство может быть опасным: анестетики, инфекции, отторжение органов и пропущенные раковые клетки могут привести к смерти пациента. Хирургам не хватает контроля на молекулярном уровне. Тело функционирует с помощью молекулярных машин, большинство которых расположены внутри клеток. Хирурги не могут видеть ни молекулы, ни клетки, и не могут восстанавливать их.

Медикаментозная терапия воздействует на организм на молекулярном уровне. Некоторые методы лечения — например, инсулин для диабетиков — поставляют вещества, которых не хватает организму. Большинство — например, антибиотики — вводят вещества, которые человеческий организм не производит. Препарат состоит из маленьких молекул; в нашем симулированном молекулярном мире многие поместились бы в вашей ладони. Эти молекулы вводятся в организм (иногда даже в

определенную область с помощью укола), где они попадают в кровь и перемещаются по тканям. По пути они обычно сталкиваются с другими молекулами всех видов, но прикрепляются и влияют только на молекулы определенных видов.

Антибиотики, например, пенициллин, являются избирательными ядами. Они прикрепляются к молекулярным машинам бактерий и подавляют их, борясь, таким образом с инфекцией. С вирусами справляться труднее, потому что они проще и имеют меньше уязвимых молекулярных машин. С червями, грибами и простейшими также бороться трудно, потому что их молекулярные машины очень похожи на те, что обнаруживаются в организме человека, и, следовательно, их сложнее избирательно подавить. Рак является самым сложным из всех. Злокачественные новообразования состоят из клеток человека, и попытки отравить раковые клетки обычно отравляют и самого пациента.

Молекулы других лекарств связываются с молекулами в организме человека и изменяют их поведение. Некоторые снижают секрецию желудочной кислоты, стимулируют почки или влияют на молекулярную динамику мозга. Разработка молекул лекарств для лечения конкретных болезней сегодня является растущей отраслью, где можно получить быструю выгоду, что должно стимулировать развитие молекулярной инженерии.

Ограниченные возможности

Современная медицина ограничена как своим пониманием, так и своими инструментами. Во многих отношениях это все еще больше искусство, чем наука. Марк Пирсон из «Du Pont» отмечает: «В некоторых областях медицина стала намного более научной, а в других — этого не произошло. Нам все еще не хватает того, что я считаю разумным научным уровнем. Многие люди не осознают этого, мы просто не знаем, как все работает. Это все равно, что иметь автомобиль, и надеяться, что, разобрав его на детали, мы поймем, как он работает. Мы знаем, что впереди установлен двигатель, и мы знаем, что он находится под капотом. Мы знаем, что он большой и тяжелый, но мы на самом деле не видим колец, которые позволяют поршням скользить в блоке. Мы даже не понимаем, что контролируемые взрывы ответственны за обеспечение энергией, которая приводит машину в движение».

Совершенные инструменты могут обеспечить как лучшие знания, так и лучшие способы применения этих знаний для

лечения. В настоящее время с помощью операции можно заменить кровеносные сосуды, но такой способ лечения слишком груб, чтобы заменить или восстановить клетки. Современная лекарственная терапия может применяться против некоторых специфических молекул, но только некоторых, и только определенных. Сегодня врачи не могут воздействовать на молекулы в одной клетке, оставляя одинаковые молекулы в соседней клетке нетронутыми, потому что современная медицина не может применить хирургический контроль на молекулярном уровне.

Нанотехнологии в медицине

Развитие нанотехнологий приведет к улучшению медицинских датчиков. Как отмечает химик, занимающийся белками, Билл Деградо: «Вероятно, первое, что вы можете увидеть, — это диагностика: возможность взять у кого-то небольшое количество крови, всего лишь сделав укол, и диагностировать сотни различных болезней. Биологические системы уже способны сделайте это, и я думаю, что мы сможем создать молекулы или сборки молекул, которые имитируют биологическую систему».

Однако в более долгосрочной перспективе применение нанотехнологий в медицине станет историей распространения хирургического контроля на молекулярный уровень. Самым простым приложением будет помощь иммунной системе, которая избирательно атакует захватчиков вне тканей. Более сложные применения потребуют, чтобы медицинские наномашины имитировали лейкоциты, поступая в ткани для взаимодействия с их клетками. Дальнейшие применения будут включать в себя сложные операции на молекулярном уровне на отдельных клетках.

Когда мы рассмотрим, как решать различные проблемы, вы заметите, что некоторые из них, которые выглядят сегодня сложными, станут со временем простыми, а другие, представляющиеся легкими, окажутся вдруг трудными. Оценка сложности лечения заболеваний постоянно меняется: когда-то полиомиелит был частым и неизлечимым, сегодня его легко предотвратить. Сифилис в свое время приводил к физической деградации, ведущей к безумию и смерти; теперь он вылечивается уколом.

Травмы спортсмена никогда не рассматривались как большое бедствие, но их все еще трудно вылечить. Аналогично с простудой. Эта тенденция будет сохраняться: смертельные болезни можно будет легко вылечить, в то время как незначительные останутся неизлечимыми, или наоборот. Как мы увидим, развитая медицина, основанная на нанотехнологиях, способна справиться практически с любой физической проблемой, но представление о сложности лечения может меняться самым удивительным образом. Природа не заботится о нашем чувстве уместности. Ужасность и сложность — это не одно и то же.

Работа вне тканей

Один из подходов к наномедицине заключается в использовании микроскопических мобильных устройств, созданных при помощи оборудования для молекулярного производства. Они будут напоминать защитные устройства для экосистем и мобильные очистительные машины, которые обсуждались в предыдущей главе. Как и те, они могут быть биоразлагаемыми, саморазборными или уничтожаться кем-то еще, как только закончат работать. Как и те, разрабатывать их будет сложнее, чем простые стационарные наномашины, но при этом они явно осуществимы и полезны. Разработка начнется с более простых приложений, поэтому давайте начнем с рассмотрения того, что можно сделать, не проникая в живые ткани.

Кожа — самый большой орган тела, и то, что она ничем не защищена, подвергает ее большому риску. Однако ее доступность облегчает лечение. Среди самых ранних применений молекулярного производства могут быть такие популярные, квазимедицинские продукты как косметика. Крем, наполненный наномашинами, может выполнять более качественную и более избирательную работу по очистке кожи, чем любой современный продукт. Он может удалить нужное количество омертвевшей кожи или излишний жир, добавить недостающие масла, нанести нужное количество природных увлажняющих составов и даже достичь неуловимой цели «глубокой очистки пор», фактически проникая в поры и вымывая все лишнее. Крем может быть отличным материалом с легким отшелушивающим эффектом.

Рот, зубы и десны поражают воображение. Сегодня ежедневная стоматологическая помощь — это бесконечный цикл чистки зубов с помощью щетки и зубной нити, с тем, чтобы максимально обезопасить зубы от кариеса и болезней десен. Жидкость для полоскания рта, наполненная умными наномашинами, могла бы выполнять все, что делают щетки и зубные нити, и при этом с гораздо меньшими усилиями, повышая пользу от их использования.

Эта жидкость для полоскания рта выявила бы и уничтожила болезнетворные бактерии, позволяя безвредной флоре рта развиваться в здоровой экосистеме. Кроме того, устройства могли бы распознавать частицы пищи, зубного налета или зубного камня и очищать от них зубы. Помещенные в жидкость и способные там свободно передвигаться устройства могли бы достигать поверхностей, недоступных для щетины зубной щетки

или волокон нити. Срок действия подобных медицинских наноустройств должен быть коротким. Необходимо, чтобы уже через несколько минут они распадались на материалы, подобные тем, которые содержатся в продуктах питания (например, волокно). При таком ежедневном уходе за зубами с раннего возраста кариес и болезни десен, скорее всего, никогда не возникнут. А если все-таки появятся, то будут значительно ослаблены.

Переход от поверхностного лечения к более глубокому подразумевает перемещение между клетками и их модификацию. Давайте рассмотрим, как можно лечить внутренние болезни, но, не проникая в ткани организма. Кровеносная система переносит все, от питательных веществ до клеток иммунной системы с ее химическими сигналами и инфекционными организмами.

Рисунок 11. ИММУННЫЕ МАШИНЫ

Медицинские наноустройства могут усиливать действие иммунной системы, обнаруживая и уничтожая нежелательные бактерии и вирусы. Иммунное устройство на переднем плане обнаружило вирус; другой коснулся эритроцита. Адаптировано из Scientific American, январь 1988 г.

Здесь полезно подумать о медицинских наномашинах, которые похожи на маленькие подводные лодки, таких, как изображенные на рис. 11. Каждая из них достаточно велика, чтобы иметь мощный нанокомпьютер, сравнимый со средним компьютером середины 1980-х годов, вместе с огромной базой данных (миллиард байт), полный набора инструментов для идентификации биологических объектов и уничтожения вирусов,

бактерий и других паразитов. Иммунные клетки, как мы уже видели, путешествуют по кровеносной системе, проверяя все на предмет инородности и — при правильной работе — атакуют и уничтожают все чужое. Иммунные машины сделают и то, и другое. Благодаря встроенным датчикам и компьютерам они смогут реагировать на те же молекулярные сигналы, что и иммунная система, но с большей разборчивостью. Перед тем, как они попадут в организм для поиска и уничтожения инородных тел, их действия можно запрограммировать, подбирая параметры, которые позволяют им четко отличать свои цели от всего остального. Иммунная система организма может реагировать только на вторгающиеся объекты, с которыми ранее сталкивался организм человека. А вот иммунные машины могут быть запрограммированы реагировать на все, что встречалось когда-либо в мировой медицине.

Иммунные машины могут быть разработаны для использования в кровеносных сосудах или пищеварительном тракте (ополаскиватель для рта, описанный выше, использовал эти способности для выслеживания вредных бактерий). Они могут плавать и циркулировать, как это делают антибиотики, при поиске объектов для нейтрализации. Чтобы избежать атаки белых кровяных телец организма, иммунные машины должны отображать на своих поверхностях стандартные молекулы, которые организм распознает как свои и которым доверяет, — как сотрудника полиции в знакомой форме.

Когда вредные бактерии идентифицированы, их можно проколоть, выпуская содержимое и лишая его возможности эффективно действовать. Если известно, что содержимое само по себе опасно, иммунная машина могла бы удерживать его достаточно долго, чтобы полностью ликвидировать.

Как иммунные машины узнают, что пора заканчивать работу? Если профессионально подготовленный врач уверен, что лечение должно продолжаться, скажем, целый день, следует использовать устройства, которые ликвидируются через двадцать четыре часа. Если необходимое для лечения время нельзя точно установить, врач может отслеживать прогресс выздоровления и останавливать действие иммунных машин по своему усмотрению, посылая определенную молекулу — возможно, аспирин или что-то еще более безопасное — в качестве сигнала о прекращении работы. После чего устройства будут выведены из организма вместе с другими отходами.

Работа в тканях

В большинстве частей тела здоровые кровеносные сосуды и капилляры, проходят на расстоянии нескольких диаметров клеток от тканей тела. Некоторые лейкоциты могут покинуть эти сосуды и смешаться с соседними клетками. Иммунные машины и подобные устройства, будучи еще меньше, могли бы сделать то же самое. В некоторых тканях это произойдет легко, в некоторых сложнее, но при тщательном проектировании и тестировании, по существу, любая точка тела должна стать доступной для заживления.

Простая борьба с бактериями в кровеносных сосудах станет серьезным шагом вперед, сократив их численность и препятствуя их распространению. Однако передвижные медицинские наномашины смогут выследить чужеродные тела по всему телу и полностью их уничтожить.

Уничтожение захватчиков

Рак является ярким примером. Иммунная система отождествляет и устраняет большинство потенциальных видов рака, но некоторые пропускает. Врачи могут распознавать раковые клетки по их внешнему виду и по молекулярным маркерам, но не всегда могут удалить их все путем хирургического вмешательства и часто не могут обнаружить оставленный ими яд. Иммунные машины, однако, без труда идентифицируют раковые клетки и в конечном итоге смогут выследить их и уничтожить, где бы они ни росли. Уничтожение каждой раковой клетки излечит рак.

Бактерии, простейшие, черви и другие паразиты имеют еще более очевидные молекулярные маркеры. После идентификации они могут быть уничтожены, избавляя организм от болезней, которые они вызывают. Таким образом, иммунные машины могут бороться с туберкулезом, фарингитом, проказой, малярией, амебной дизентерией, сонной болезнью, речной слепотой, анкилостомозом, простудой, кандидозом, лихорадкой долины Рифт, устойчивыми к антибиотикам бактериями и даже спортивными травмами. Все они вызваны вторжением клеток или более крупных организмов (таких как черви). По оценкам работников здравоохранения распространенными в странах третьего мира паразитарными болезнями страдают более одного миллиарда человек. Для многих из этих болезней не существует

удовлетворительного лекарственного лечения. Однако, в конечном итоге, все эти угрозы здоровью человека могут быть устранены с помощью достаточно продвинутой формы наномедицины.

Клеточное стадо

Уничтожение чужеродных организмов будет полезно, но травмы и поврежденные ткани создают другие проблемы. По-настоящему передовая медицина сможет наращивать и перестраивать ткани. Здесь медицинские наноустройства могут стимулировать и направлять собственные механизмы построения и восстановления организма для восстановления здоровых тканей.

Что такое здоровая ткань? Она состоит из нормальных клеток нормальной формы, объединенных в нормальную структуру, с нормальными связями с окружающими тканями. Хирурги сегодня (с их огромными, грубыми инструментами) могут решить некоторые проблемы на уровне тканей. Рана нарушает здоровые связи между двумя разными кусочками ткани, и хирургические клеи и швы могут частично решить эту проблему, удерживая ткани в положении, способствующем заживлению. Аналогичным образом, операция по шунтированию коронарной артерии приводит к более здоровой общей конфигурации тканей, обеспечивающей подачу крови к сердечной мышце. Хирурги режут и сшивают, чтобы излечить раны как можно лучше, при этом они должны полагаться на ткань.

Исцеление устанавливает здоровые связи на самом маленьком масштабе. Клетки должны делиться, расти, мигрировать и заполнять пробелы. Они должны реорганизоваться, чтобы сформировать правильно связанные сети мелких кровеносных сосудов. И клетки должны поставлять материалы для формирования структурного межклеточного матрикса — коллагена для обеспечения правильной формы и прочности мышц или минеральных веществ для обеспечения жесткости костей. Вместо этого они часто образуют нежелательные рубцы, мешая правильному заживлению.

При наличии достаточных знаний о том, как эти процессы работают (наноинструменты могут помочь собрать эти знания), и при наличии достаточно хорошего программного обеспечения для управления процессом — а это более сложная задача — медицинские наномашины смогут управлять процессом заживления. Проблема в том, чтобы направлять движение и

поведение толпы активных, живых клеток — процесс, который можно назвать управлением «клеточным стадом».

Клетки реагируют на множество сигналов из окружающей среды: на химикаты во внутренних жидкостях, на сигналы молекул соседних клеток и на механические силы, действующие на них. Устройства для управления «клеточным стадом» будут использовать эти сигналы для стимулирования деления клеток там, где это необходимо, и для предотвращения деления там, где его не должно быть. Они должны подталкивать клетки, чтобы побудить их перемещаться в нужных направлениях, или просто соберут и двинут вперед, чтобы доставить при необходимости в нужное место, побуждая их прижаться надлежащим образом к своими соседями. Наконец, они будут стимулировать клетки окружать себя соответствующими материалами межклеточного матрикса. Или — как владелец маленькой собаки, который в холодный день одевает ее в шерстяную одежду — они будут самостоятельно строить необходимые окружающие структуры для клеток на новом месте.

Таким образом, сотрудничающие группы устройств для управления «клеточным стадом» могут направлять процесс заживления или восстановления структур тканей, обеспечивая, чтобы их клетки формировали здоровые структуры и здоровый матрикс и чтобы эти ткани не вступали в конфликт с окружающей средой. Там, где это необходимо, можно даже отрегулировать внутренности клетки, мы обсудим это позже.

Восстановление тканей

С кожей можно проделать простые манипуляции, что может стать естественным пунктом для начала подобных операций на практике. Люди часто хотят иметь волосы там, где их нет, и голую кожу там, где у них растут волосы. Машины управления «клеточным стадом» могут перемещать или разрушать клетки волосяного фолликула, удаляя нежелательные волосы, или выращивать больше необходимых клеток и размещать их в нужный фолликул, где волосы желательны. Регулируя размер фолликула и свойства некоторых клеток, можно сделать волосы более грубыми, тонкими, прямыми или завитыми. Все эти изменения не вызовут боли, не потребуют токсичных химических вещества и не приведут к дурному запаху. Устройства для управления «клеточным стадом» могут проникать в живые слои кожи, удаляя нежелательные клетки, стимулируя рост новых клеток, сужая неестественно выступающие кровеносные сосуды,

обеспечивая хорошую циркуляцию, направляя рост любых необходимых нормальных кровеносных сосудов и перемещая клетки и волокна, устраняя даже глубокие морщины.

С другой стороны, «клеточное стадо» коренным образом меняет лечение опасных для жизни болезней. Например, наиболее распространенной причиной сердечных заболеваний является снижение или прерывание кровоснабжения сердечной мышцы. При перекачке насыщенной кислородом крови в остальную часть тела сердце отводит часть ее для собственного использования через коронарные артерии. Когда эти кровеносные сосуды сжимаются, мы говорим о заболевании коронарной артерии. Когда они блокируются, в результате чего сердечная мышечная ткань отмирает, мы говорим, что это «коронарная болезнь», еще один термин для обозначения сердечного приступа.

Устройства, работающие в кровеносной системе, могут разрушать атеросклеротические отложения, расширяя пораженные кровеносные сосуды. Устройства для управления «клеточным стадом» могут восстановить здоровье стенок артерий и самих артерий, обеспечивая правильное расположение нужных клеток и поддерживающих структур. Это предотвратит большинство сердечных приступов.

Но что, если сердечный приступ уже разрушил мышечную ткань, оставив пациента с поврежденным и плохо работающим сердцем? Еще раз, устройства для управления «клеточным стадом» могут исправить положение, прокладывая себе путь в рубцовую ткань и постепенно удаляя ее, заменяя свежим мышечным волокном. При необходимости, это новое волокно может быть выращено с помощью ряда внутренних молекулярных стимулов к выбранным клеткам сердечной мышцы, чтобы «напомнить» им о программах роста, которые они использовали десятилетиями ранее во время эмбрионального развития.

Возможности управления «клеточным стадом» также должны справляться с различными формами артрита. Там, где это происходит из-за атак со стороны собственной иммунной системы, клетки, продуцирующие повреждающие антитела, могут быть идентифицированы и устранены. Затем система управления «клеточным стадом» работала бы внутри сустава, где она удаляла бы больные ткани, кальцифицированные шпоры и т. д. А затем переделывала бы структуры клеток и межклеточного материала для формирования здорового, гладко работающего и безболезненного сустава. Очевидно, что восстановление работы сердца и восстановление суставов будут иметь некоторые общие технологии, но большая часть исследований и разработок должна быть посвящена конкретным тканям и конкретным

обстоятельствам. Подобный процесс — но, опять же, специально адаптированный к обстоятельствам — может быть использован для укрепления и изменения формы кости, коррекции остеопороза.

В стоматологии этот процесс можно использовать для заполнения полостей не амальгамой, а натуральным дентином и эмалью. Наступит время, когда благодаря наномедицинским устройствам для очистки карманов, соединения тканей и направления отрастания будет легко обратить вспять разрушительные последствия заболеваний пародонта. Даже отсутствующие зубы могут быть восстановлены при достаточном контроле за поведением клеток.

Работа с клетками

Для перемещения по тканям, не оставляя следов разрушения, потребуются устройства, способные манипулировать и направлять движения клеток и восстанавливать их. Многое еще предстоит изучить — и это будет легко освоить с помощью наноразмерных инструментов — однако даже современных знаний о клетках достаточно для начала обсуждения проблемы о том, как проводить операции на клетках.

Клеточная биология является быстро развивающейся областью уже сегодня. Клетки можно заставить жить и расти в лабораторных культурах, если они помещены в жидкость с подходящими питательными веществами, кислородом и остальными необходимыми компонентами. Даже с сегодняшними грубыми методами было подробно изучено, как клетки реагируют на разные химические вещества, на разных соседей и даже на то, когда их тыкают иголками. Многие годы в научных лабораториях проводилось грубое хирургическое вмешательство в отдельные клетки.

Сегодня исследователи могут вводить новую ДНК в клетки с помощью крошечной иглы; мелкие проколы в клеточной мембране автоматически зарастают. Но оба эти метода используют инструменты, которые в клеточном масштабе являются большими и неуклюжими — это все равно, что делать операцию топором или шаром для сноски зданий вместо скальпеля. Наноразмерные инструменты позволят проводить медицинские процедуры, включая деликатные операции, на отдельных клетках.

Уничтожение вирусов с помощью клеточной хирургии

Некоторые вирусные заболевания поддаются лечению, для этого необходимо уничтожить вирусы в носу, горле или в кровеносной системе. Примерами являются грипп и простуда. Лечение многих других болезней будет улучшено, но они не будут окончательно побеждены. Все вирусы действуют, вводя свои гены в клетку и захватывая ее молекулярный механизм, чтобы потом использовать его для производства большего количества вирусов. Это, в частности, делает лечение вирусных заболеваний таким трудным — большая часть действия выполняется собственными молекулярными машинами организма, которые не могут действовать на все вирусы сразу. Когда иммунная система имеет дело с вирусным заболеванием, она одновременно атакует свободные вирусные частицы, прежде чем они попадут в клетки, и атакует зараженные клетки, прежде чем они смогут произвести слишком много других вирусных частиц.

Некоторые вирусы, однако, вставляют свои гены в гены клетки, и никак себя при этом не проявляют. Клетка может казаться совершенно нормальной для иммунной системы в течение нескольких месяцев или лет, пока вирусные гены не вступят в действие и не начнут инфекционный процесс заново. Эта модель ответственна за персистенцию герпетической инфекции и за медленный, смертельный прогресс СПИДа.

Эти вирусы могут быть устранены с помощью клеточной хирургии на молекулярном уровне. Требуемые устройства могут быть достаточно маленькими, чтобы при необходимости полностью помещаться в клетку. Грег Фахи, который возглавляет проект по криоконсервации органов в Лаборатории трансплантации Джерома Холланда Американского Красного Креста, пишет: «Расчеты подразумевают, что молекулярные датчики, молекулярные компьютеры и молекулярные эффекторы могут быть объединены в устройство, достаточно маленькое, чтобы легко поместиться в одной клетке и достаточно мощное, чтобы восстанавливать молекулярные и структурные дефекты (или разрушать чужеродные структуры, такие как вирусы и бактерии) непосредственно при их появлении… Нет никаких причин считать, что такие системы не могут быть построены и не смогут функционировать, как задумано».

Точно так же устройство для клеточной хирургии, расположенное вне клетки, может проникать через мембрану с помощью длинных зондов. На концах зондов будут установлены инструменты и датчики, а также, возможно, небольшой вспомогательный компьютер. Они могли бы проникать через многочисленные мембраны, распаковывать и разматывать ДНК, считывать ее информацию, сравнивать последовательности в

одной клетке с последовательностями других клеток и переупаковывать заново, заменяя поврежденные куски.

При чтении расшифрованной генетической цепочки вируса СПИДа, машина молекулярной хирургии может быть запрограммирована реагировать как иммунная машина, разрушая клетки. Но, похоже, более разумно просто вырезать гены вируса СПИДа и заново соединять концы, какими они были до заражения. Делая это и убивая любые вирусы, найденные в клетке, процедура восстановит здоровье клетки.

Молекулярный ремонт

Клетки состоят из миллиардов молекул, каждая из которых действует как молекулярная машина. Молекулы самоорганизуются, образуя более крупные структуры, многие из которых постоянно изменяются, разрушаясь и совершенствуясь. Устройства для клеточной хирургии смогут производить молекулы, которых организму не хватать, при этом, разрушая молекулы, которые повреждены или присутствуют в избытке. Они смогут не только удалять вирусные гены, но и восстанавливать химическое или радиационное повреждение собственных генов клетки. Усовершенствованные устройства для клеточной хирургии смогут восстанавливать клетки практически независимо от начального состояния их повреждения.

Активируя и отключая гены клетки, они смогут стимулировать деление клеток и определять, какие типы клеток образуются. Это будет большим подспорьем для управления «клеточным стадом» и заживления тканей.

Поскольку хирурги сегодня полагаются на спонтанную, самоорганизующуюся способность клеток и тканей соединяться и залечивать органы, которые они оперируют, так и устройства для клеточной хирургии будут полагаться на спонтанную самоорганизующуюся способность молекул присоединяться и «лечить» органы, которые они собирают. Заживление хирургической раны включает в себя удаление мертвых клеток, рост новых клеток и медленный и действительно болезненный процесс реорганизации тканей. В противоположность этому, соединение молекул является почти мгновенным и происходит в масштабе значительно меньшем, чем необходимо для срабатывания наиболее чувствительного болевого рецептора. «Заживление» не начнется после того, как восстановительные устройства выполнят свою работу, как это происходит в обычной хирургии: скорее, когда они завершат свою работу, ткань уже будет излечена.

Исцеление тела и конечностей

Способность управлять клетками и восстанавливать молекулы, а также клеточная хирургия откроют новые перспективы для медицины. Эти способности применяются в небольших масштабах, но эффект от их использования может стать огромным.

Корректирующая химия

При многих заболеваниях организм в целом страдает от неправильной регуляции сигнальных молекул, которые проходят через его жидкости. Многие из них редки: болезнь Кушинга, болезнь Грейвса, болезнь Педжета, болезнь Аддисона, синдром Конна, синдром Прадера-Лабхарта-Вилли. Другие широко распространены: миллионы пожилых женщин страдают от остеопороза, ослабления костей, что может сопровождаться снижением уровня эстрогена.

Диабет убивает достаточно часто, чтобы войти в первую десятку причин смерти в Соединенных Штатах. Известно, что число заболевших диабетом удваивается каждые пятнадцать лет. В Соединенных Штатах это главная причина слепоты и других осложнений, включая повреждение почек, катаракту и сердечно-сосудистые болезни. Современная молекулярная медицина пытается решить эти проблемы, поставляя недостающие молекулы: диабетикам вводят дополнительный инсулин. Хотя это полезно, это не излечивает болезнь и не устраняет все симптомы. В эпоху молекулярной хирургии врачи могли бы вместо этого восстановить поврежденный орган, чтобы он снова мог регулировать свои собственные химические вещества и корректировать метаболические свойства других клеток в организме. Это было бы настоящим исцелением, намного лучшим, чем простое подавление симптомов.

Только сейчас исследователи добиваются прогресса в еще одной частой проблеме метаболической регуляции: ожирении. Когда-то считалось, что это имеет одну простую причину (потребление лишних калорий) и один основной результат (большую округлость, чем одобряет сегодняшняя эстетика), но оба предположения оказались неверными. Ожирение является серьезной медицинской проблемой, увеличивающей риск развития сахарного диабета, остеоартрита, дегенеративных заболеваний сердца, артерий и почек, а также сокращения продолжительности жизни. Предполагалось, что виновато простое переедание, но было доказано, что это не так — то, о чем люди, сидящие на диете, всегда подозревали, поскольку они наблюдали, как худые коллеги обжираются и все же не набирают вес.

Возможность создавать запасы жира была очень важна для людей. Давным-давно, когда запасы продовольствия пополнялись нерегулярно, а кочевые и мародерские банды делали хранение продуктов трудным и рискованным, голод был распространенной

причиной смерти. Наши тела все еще приспособлены к этому миру и соответственно регулируют жировые запасы. Вот почему диета часто имеет неочевидные последствия. Тело, когда испытывает голод, реагирует, пытаясь увеличить запасы жира при любой возможности. Основной эффект упражнений в снижении веса заключается не в том, чтобы сжигать калории, а в том, чтобы дать сигнал организму приспособиться к эффективной мобильности.

Следовательно, ожирение, по-видимому, связано с химическими процессами в организме, которые подают сигналы для накопления жира, ожидая голода или для похудения при движении. Наномедицина сможет управлять этими сигналами в кровеносной системе и регулировать реакцию отдельных клеток в организме. Последнее даже сделало бы возможным неуловимую «программу точечного снижения», чтобы изменить распределение жира в организме.

Здесь, как и во многих потенциальных применениях нанотехнологий, проблема может быть решена в первую очередь другими способами. Однако некоторые проблемы почти наверняка потребуют наномедицину.

Новые органы и конечности

До сих пор мы видели, как медицинская нанотехнология будет использоваться в более простых приложениях вне тканей — например, в крови — затем внутри тканей и, наконец, внутри клеток. Подумайте, как эти способности будут применяться для жертв автомобильных и мотоциклетных аварий.

Наноматериалы медицинского назначения будут иметь огромное значение для тех, кто получил тяжелую травму. Возьмите пациента с раздробленным или разорванным спинным мозгом высоко на спине или на шее. Последнее исследование дает надежду, — если таких пациентов лечат сразу после получения травмы, паралич может быть хотя бы частично предотвращен, пусть и не всегда. Но те, чьи травмы не лечили вовремя, включая практически всех современных пациентов, остаются парализованными. Несмотря на то, что продолжаются исследования различных попыток помочь процессу самопроизвольного заживления, перспективы устранения такого рода повреждений с помощью традиционной медицины остаются безрадостными.

С помощью методов, рассмотренных выше, станет возможным удалить рубцовую ткань и направить рост клеток, чтобы обеспечить здоровое распределение клеток в микроскопическом масштабе. При правильном подборе молекулярного масштаба и подталкивании ядра клетки, даже нервные клетки головного и спинного мозга, могут быть принуждены к делению. Там, где нервные клетки были разрушены, должна быть возможна замена. Эти технологии в конечном итоге позволят медицине излечить поврежденный спинной мозг, полностью исключив паралич.

Способность управлять ростом и делением клеток, а также структурой тканей будет достаточной для выращивания целых органов и конечностей, а не только для восстановления того, что было повреждено. Это позволит медицине возвращать физическое здоровье, несмотря на самые тяжелые травмы.

Если в это трудно поверить, вспомните, как медицинские достижения потрясали мир до сих пор. В прошлом, идея разрезать людей ножом безболезненно казалась бы чудом, но хирургическая анестезия стала обычным делом. Точно так же было с бактериальными инфекциями и антибиотиками, с искоренением оспы и вакциной от полиомиелита: каждое из этих заболеваний внушало людям смертельный ужас, теперь это наполовину забытые истории. Наше внутреннее ощущение того, что кажется вероятным, имеет мало общего с тем, что можно и нельзя сделать

с помощью медицинских технологий. Это связано с нашими привычными страхами, включая страх тщетных надежд. Но то, что поражает одно поколение, кажется очевидным и даже скучным для следующего. И дети, родившиеся после каждого прорыва, растут, задаваясь вопросом, почему это так волновало людей?

Конечно, наномедицина не будет панацеей. Представьте себе пятидесятилетнего умственно отсталого мужчину с умом двухлетнего ребенка, или женщину с опухолью мозга, которая распространилась до такой степени, что ее личность изменилась: как они могут быть «исцелены»? Никакое заживление тканей не может восполнить пропущенный опыт взрослой жизни и не восстановит утраченную информацию из сильно поврежденного мозга. Лучшее, что могли бы сделать врачи, — привести пациентов в физически здоровое состояние. Можно желать большего, но иногда это невозможно.

Первая помощь

На протяжении веков медицина была вынуждена поддерживать здоровые ткани, поскольку, как только ткани перестают функционировать, они не могут излечить себя. С помощью молекулярной хирургии для непосредственного лечения медицинские приоритеты резко меняются — работоспособность больше не является абсолютно необходимой. Фактически, врач, способный использовать молекулярную хирургию, предпочел бы оперировать нефункционирующую, структурно стабильную ткань, чем ту, которой позволили продолжать функционировать до тех пор, пока ее структура окончательно не разрушится.

Например, опухоли головного мозга: они разрушают структуру мозга, а вместе с ним навыки, воспоминания и личность пациента. Врачи в будущем должны иметь возможность немедленно прервать этот процесс деградации, приостановив функционирование мозга, и стабилизировать пациента для лечения.

Методы, доступные сегодня, могут приостановить функционирование ткани, сохраняя ее структуру. Грег Фахи в своей работе по сохранению органов в Американском Красном Кресте разрабатывает технику для замораживания почек животных — превращения их в низкотемпературную стекловидную массу — с целью сохранения их структуры, чтобы потом, при комнатной температуре, они могли быть пересажены. Некоторые почки были охлаждены до —30 ˚C, снова нагреты, и функционировали после трансплантации.

Другие процедуры также могут стабилизировать ткани на долгосрочной основе. Эти процедуры позволяют многим клеткам — но не целым тканям — выживать и регенерировать без посторонней помощи; возможности современного молекулярного восстановления и клеточная хирургия, по-видимому, нарушат баланс, позволив клеткам, тканям и органам исцеляться и функционировать. Подобное состояние стабилизации всего тела пациента можно назвать биостазисом. Пациент в биостазисе может находиться до бесконечности, пока не прибудет необходимая медицинская помощь. Таким образом, в будущем вопрос: «Может ли этот пациент восстановить здоровье?» ответят: «Да, если мозг пациента не поврежден, а вместе с ним и разум пациента».

Сандра Ли Адамсон из Национального космического общества думает о будущем. Некоторые предполагают, что

путешествие к звездам займет несколько поколений, что не позволит ни одному землянину совершить такое путешествие. Но она отмечает, что биостазис «даст надежду некоторым бесстрашным авантюристам, которые рискнут приостановкой своих жизненных функций и последующей реанимацией, все-таки самим увидеть звезды».

Страхование от чумы

Медицинские нанотехнологии обещают продлить здоровую жизнь, но если история чему-то учит, они также могут предотвратить внезапную массовую смерть. Слово «чума» сегодня редко употребляется, за исключением случаев, связанных со СПИДом; он вызывает ассоциации с черной смертью средневековья, когда треть Европы вымерла в 1346-50 годах. Опасный грипп, обрушившийся в 1918 году, почти затерялся в новостях о Первой мировой войне: но многие ли из нас понимают, что он убил по меньшей мере 20 миллионов? Люди часто ведут себя так, будто язвы исчезли навсегда, как будто санитария и антибиотики победили их. Но врачи постоянно говорят своим пациентам: антибиотики убивают бактерии, но не действуют на вирусы. Грипп, насморк, герпес и СПИД — ни у кого нет действительно эффективного их лечения, потому что все они вызваны вирусами. По оценкам, в некоторых африканских странах до 10 процентов населения заражены вирусом, вызывающим СПИД. Без скорейшего излечения в будущем ожидается крутой рост смертности от СПИДа. СПИД является мрачным напоминанием о том, что великие бедствия истории еще не преодолены.

Угроза

Новые болезни продолжают появляться в наше время, как это было на протяжении всей истории. Население сейчас намного больше, чем в любом предыдущем веке, что предоставляет огромную плодородную почву для их распространения.

Современные транспортные системы способны распространять вирусы с континента на континент за один день. Когда, в прежние времена, корабли совершали длительные путешествия и переплывали моря, инфицированный пассажир, скорее всего, успевал до прибытия в порт назначения проявить свое заболевание в полной мере, что позволяло объявить карантин. Но за часы полета самолета гарантированно поставить диагноз практически невозможно.

Как известно, каждый вид организма, от бактерии до кита, поражен вирусами. Они иногда «прыгают между видами», заражая других животных или людей. Большинство ученых считают, что предки вируса СПИДа до недавнего времени могли заражать только определенных африканских обезьян. Затем эти вирусы совершили межвидовой скачок. Подобный инцидент произошел в 1960-х годах, когда ученые из Западной Германии внезапно заболели, работая в Уганде с клетками обезьян. Десятки были инфицированы, а некоторые умерли от болезни, которая вызвала кровяные тромбы и кровотечение, вызванное тем, что сейчас называется вирусом Марбург. Что, если вирус Марбург распространяется воздушно-капельным путем, как грипп или простуда?

Мы думаем о людских болезнях как о проблеме со здоровьем, но когда они поражают наших младших собратьев, мы склонны рассматривать их с экологической точки зрения. В конце 1980-х годов более половины популяции морского котика в большей части Северного моря внезапно погибли, вначале многие стали винить в этом загрязнение окружающей среды. Но на самом деле, причиной, по-видимому, стал вирус чумы плотоядных, которым они заразились от собак. Биологи опасаются, что вирус может заразить виды тюленей по всему миру, поскольку вирус чумы плотоядных может распространяться воздушно-капельным путем, то есть при кашле, а тюлени живут в тесном физическом контакте. Пока что его смертность составляет от 60 до 70 процентов.

Что касается самого СПИДа: может ли он измениться и привести к появлению формы, способной распространяться, скажем, как простуда? Нобелевский лауреат Говард М. Темин

сказал: «Я думаю, что мы можем с уверенностью сказать, что этого не может быть». Нобелевский лауреат Джошуа Ледерберг, президент Рокфеллеровского университета в Нью-Йорке, ответил: «Я не разделяю вашу уверенность в том, что может или не может произойти». Он указывает, что «нет причины, по которой великая чума не может повториться… Мы живем в эволюционной конкуренции с микробами, бактериями и вирусами. Нет никаких гарантий, что мы выживем».

Наши неадекватные способности

Бактериальные заболевания сегодня в основном поддаются контролю. Санитария ограничивает пути распространения чумы. Эти меры достаточно хороши, чтобы заставить нас считать, что проблема решена.

Вирусы распространяются, вирусы мутируют; некоторые переносятся по воздуху, и многие из них смертельно опасны. Эпидемии чумы показывают, что быстро распространяющиеся заболевания могут быть смертельными, а эффективные противовирусные препараты все еще редки.

Единственные действительно эффективные методы лечения вирусных заболеваний — профилактические, а не лечебные. Они работают либо путем предотвращения воздействия, либо путем предварительного воздействия на организм мертвых, безвредных или фрагментарных форм вируса, чтобы подготовить иммунную систему к будущему воздействию. Как показывает длительная борьба за создание вакцины против СПИДа, современная медицина не может рассчитывать, что при выявлении нового вируса удастся создать эффективную вакцину в течение одного месяца или года, или даже одного десятилетия. Но эпидемии гриппа распространяются быстро, и Марбург II или СПИД II, или что-то совершенно новое и смертельное может сделать то же самое.

Делать лучше

Смерть от следующей великой чумы могла начаться в деревне на прошлой неделе, или может начаться в следующем году, или за год до того, как мы научимся быстро и эффективно бороться с новыми вирусными заболеваниями. И только если повезет, чума проявится через год после получения лекарства.

А вот иммунные машины, можно будет использовать для уничтожения нового вируса сразу после того, как он будет идентифицирован. Инструменты, которые принесет нанотехнология, упростят идентификацию вирусов. Когда-нибудь появятся средства для защиты человеческой жизни от вирусной катастрофы.

Установление нашего контроля над молекулярным миром улучшит здравоохранение. От уничтожения вирусов до восстановления отдельных клеток. Иммунные машины, работающие в кровеносной системе, кажутся такими же сложными, как некоторые инженерные проекты, которые люди уже завершили — например, выведение на орбиту больших спутников. Другие медицинские нанотехнологии имеют более высокий уровень сложности.

Решение сложных проблем

Где-то в процессе перехода от относительно простых иммунных устройств к молекулярной хирургии мы пересекли нечеткую грань между системами, которые команды умных биомедицинских инженеров могли бы разработать за разумный промежуток времени, и системами, создание которых может оказаться невероятно сложным и занять десятилетия. Создание наномашины, способной проникать в клетку, считывать ее ДНК, находить и удалять смертельную вирусную последовательность ДНК, а затем восстанавливать клетку до нормального состояния, стало бы величайшей работой. Подобные задачи являются передовыми приложениями нанотехнологий, выходящими далеко за рамки простых компьютеров, производственного оборудования и нерешительных «умных материалов».

Чтобы добиться успеха за разумный промежуток времени, нам потребуется автоматизировать большую часть процесса исследования, включая разработку программного обеспечения. Лучшие на сегодняшний день экспертные системы еще недостаточно сложны. Программное обеспечение должно быть в состоянии применять физические принципы, инженерные правила и быстрые вычисления для создания и тестирования новых проектов. Назовите это автоматизированным проектированием.

Автоматизированное проектирование окажется полезным в развитой наномедицине из-за большого количества небольших проблем, которые необходимо решать. Организм человека содержит сотни видов клеток, образующих огромное количество тканей и органов. В целом (без учета иммунной системы), организм содержит сотни тысяч различных видов молекул. Комплексное молекулярное восстановление поврежденной клетки может потребовать решения миллионов отдельных повторяющихся проблем. Молекулярные механизмы в устройствах для клеточной хирургии должны будут управляться сложным программным обеспечением, и было бы лучше иметь возможность передать задачу написания этого программного обеспечения автоматизированной системе. До этого или пока не будет выполнено много более традиционных конструкторских работ, наномедицине придется сосредоточиться на более простых проблемах.

Старение

Какое место в списке трудностей занимает старение? Ухудшение здоровья, связанное со старением, все чаще признается как форма болезни, которая ослабляет организм и делает его восприимчивым к множеству других заболеваний. С этой точки зрения, старение так же естественно, как оспа и бубонная чума, и к тому же смертельно. Однако, в отличие от бубонной чумы, старение является следствием внутренних сбоев в молекулярном механизме организма, и медицинское состояние пациента с таким количеством различных симптомов может быть сложным.

Удивительно, но, используя уже существующие методы, удалось достигнуть существенного прогресса, даже без элементарной способности выполнять медицинские операции над клетками. Некоторые исследователи считают, что старение — это, прежде всего, результат довольно небольшого числа регуляторных процессов, многие из которых, как уже было показано, могут быть изменены. Если это так, старение может быть успешно побеждено еще до того, когда станет доступным даже простой ремонт клеток. Но процесс старения человека недостаточно хорошо изучен, чтобы можно было уверенно прогнозировать это; например, количество процессов, которые следует регулировать еще неизвестно. Окончательное решение может потребовать создания современной медицины, основанной на нанотехнологиях, однако это кажется возможным. Результатом будет не бессмертие, а гораздо более долгая и здоровая жизнь для тех, кто этого пожелает.

Восстановление видов

С медициной (и с биостазисом), связана проблема восстановления видов. Сегодня исследователи тщательно сохраняют все, что осталось от вымирающих видов. В некоторых случаях это только образцы тканей. У некоторых видов им удалось спасти зародышевые клетки в надежде когда-нибудь имплантировать оплодотворенные яйца в родственные виды и таким образом возродить (почти?) вымершие виды.

Каждая клетка обычно содержит полную генетическую информацию организма, но что с этим можно сделать? Многие исследователи сегодня собирают образцы для сохранения, думая только о сценарии имплантации, который, как они знают, уже работает. Другие занимают более широкую позицию: лидером в этом является Центр генетических ресурсов и наследия Университета Квинсленда. Дэрил Эдмондсон, координатор генной библиотеки, объясняет, что центр уникален, потому что он «будет активно собирать данные. Большинство других библиотек просто собирают свои собственные коллекции». Директор Джон Маттик описывает его как «генетический Лувр» и указывает, что, если гены современных исчезающих видов не сохранятся, «последующие поколения будут знать, что у нас была технология для сохранения ДНК, и спросят, почему мы этого не сделали». Благодаря сохраненной ДНК и возможностям молекулярного восстановления и клеточной хирургии, которые мы обсуждали, потерянные виды могут когда-нибудь вернуться к активной жизни, когда будут восстановлены места их обитания.

Одного такого центра недостаточно: центр Квинсленда занимается в основном австралийскими видами (что естественно) и имеет ограниченные средства. Кроме того, поскольку генетическая информация исчезающих видов крайне важна, она должна храниться во многих отдельных местах в целях безопасности. Нам нужно оформить страховой полис на генетическое разнообразие Земли, используя более широкую сеть генетических библиотек, и уделяя особое внимание сбору биологических образцов из быстро исчезающих дождевых лесов. Научные исследования пока могут подождать: срочность ситуации требует подхода пылесоса, собирая все, что возможно. Институт Форсайта продвигает эти усилия в рамках своего проекта BioArchive; заинтересованные читатели могут написать по адресу, указанному в конце послесловия.

Глава 11
Пределы и недостатки

Дискуссии о потенциальных экономических, медицинских и экологических выгодах могли создать ложное впечатление о том, что нанотехнологии создадут удивительную утопию, в которой решатся все человеческие проблемы, и все мы будем жить долго и счастливо. Это даже большее заблуждение, чем идея, что новые технологии всегда вызывают больше проблем, чем решают. Многие из основных препятствий и трудностей, с которыми сталкиваются люди, основаны не на технологиях или их недостатке, а на самой природе мира, в котором мы живем, и сущности нашей человеческой.

Рост благосостояния, основанного на молекулярном производстве, не положит конец экономическим проблемам так же, как этого не произошло в прошлом. Дикая природа все еще может быть уничтожена; люди могут быть угнетены; финансовые рынки могут быть нестабильными; торговые войны не прекратятся; инфляция может расти; люди, компании и страны могут влезть в долги; бюрократия может подавлять инновации; уровень налогов может стать серьезным; могут бушевать войны и терроризм. Ничто из этого не будет автоматически остановлено передовыми технологиями.

Более того, потенциальные преимущества новых технологий не появляются автоматически. Нанотехнологии могут быть использованы для восстановления окружающей среды, роста благосостояния и лечения большинства болезней. Но так ли это? Это зависит от действий человека, работающих в пределах, установленных реальным миром.

В этой главе сначала будут рассмотрены пределы возможного развития нанотехнологии, затем некоторые негативные побочные эффекты, которые могут сопровождать даже в основном хорошие применения. Далее будет обсуждаться случайные несчастные случаи, которые, в принципе, можно контролировать, и, наконец, перейдем к более серьезной проблеме потенциальных злоупотреблений новыми возможностями.

Некоторые границы возможностей нанотехнологий

Мир накладывает ограничения на то, что мы можем сделать. Технологии в целом (и нанотехнологии в частности) могут обеспечить нам дополнительную поддержку в преодолении жестких ограничений наших возможностей, иногда они могут помочь нам преодолеть старые пределы через ранее неизвестные пробелы. Но, в конце концов, мы столкнемся с новыми препятствиями. Человеческие действия будут жестко ограничены независимо от того, насколько хорошо мы научимся манипулировать атомами, молекулами или битами и байтами информации. Давайте рассмотрим некоторые из этих ограничений, начиная с самых абстрактных и долгосрочных, — но наиболее понятных и трудных для преодоления. И потом перейдем к более частным и краткосрочным.

Потеря информации

Многие проблемы принципиально отличаются от старых, материальных, вызванных ограниченностью вещества и энергии, они связаны с информацией. Одними из самых ценных хранилищ информации в мире сейчас являются генетические коды биосферы.

У каждого отдельного организма эта информация своя, она является результатом миллионов событий, которые мы не способны моделировать или воссоздавать. Если эта информация теряется, она теряется навсегда. Когда атомы, кодирующие эту информацию, полностью рассеиваются, кажется, что нет никакого способа ее восстановить.

У любого вида большая часть генетической информации является общей для всех представителей этого вида. Но различия в генетическом коде между особями важны как для самих особей, так и для здоровья и перспектив вида в целом. Рассмотрим северного белого носорога, численность которого упала примерно до тридцати двух животных, или калифорнийского кондора, которых осталось только сорок особей, содержащихся в неволе. Даже если биологам удастся восстановить эти виды — в 1989 году было выведено восемь кондоров — большая часть их генетической информации была утрачена. Еще хуже ситуация с вымершими видами, образцы тканей которых не были сохранены.

В будущем можно будет увидеть некоторые удивительные восстановления: при обработке с помощью молекулярных механизмов сухая кожа и кости могут дать полный набор генов. Уже сейчас современные методы были использованы для восстановления генов древнего листа, возраст которого почти 20 миллионов лет. Наши глаза и инструменты не могут сказать нам, сколько информации из прошлого осталось, но мы знаем, что генетическая информация теряется каждый день, а, однажды потеряв, восстановить ее нельзя.

Физические ограничения и бессмыслица

Люди часто ошибаются насчет физических ограничений, путая границы действия своей технологии с границами возможного. В результате образованные люди сначала отклоняли идею полета аппаратов тяжелее воздуха, а затем и возможность полета на Луну. Однако физические ограничения реальны, и все технологии — прошлые, настоящие и будущие — не смогут их преодолеть. Есть даже основания подозревать, что некоторые из этих пределов действительно установлены учеными.

Нанотехнология позволит приблизиться к реальным пределам, установленным естественными законами, но не сможет изменить их или вызванные ими ограничения. Они не повлияют на закон гравитации, гравитационную постоянную, скорость света, заряд электрона, радиус атома водорода, значение постоянной Планка, влияние принципа неопределенности, принцип наименьшего действия, массу протона, законы термодинамики или температуру кипения воды. Нанотехнология не будет производить энергию или материю из ничего.

Кажется, можно утверждать, что никто не построит ракету, летящую быстрее света, антигравитационную машину или кабель, вдвое прочнее алмаза. Всему есть предел. Наука сегодня может ошибаться относительно некоторых пределов, но научное знание — это наша лучшая информация о том, как работает мир, поэтому не стоит спорить с ним.

Кто-то будет утверждать, что нанотехнологии будут способны делать то, чего на самом деле они не могут, или что скоро научатся этому. Иногда это будут невинные ошибки, иногда сознательное вранье, а иногда откровенное мошенничество. Среди проблем, которые не могут решить нанотехнологии, — ошибочные заявления людей, называющих себя «учеными», «инженерами» или «бизнесменами», о том, что они совершили большой технический прорыв, который стоит целого состояния.

Каждой интересной новой технологией, особенно в первые годы ее появления, одновременно занимаются и компетентные работники, и шарлатаны. Наряду с Томасом Эдисоном, изобретающим полезные продукты, например, лампочки накаливания или прототип кинопроекторов, были люди, которые продвигали электрические расчески для лечения облысения, а также электрические туфли, электрические ремни, электрические шляпы, — и, продолжая этот список, — авторитетно утверждали, что лечат от бесплодия, избыточного веса, недостаточного веса и всех болезней и неудобств человечества. Сегодня мы смеемся над доверчивостью наших предков, которые купили эти гаджеты; но воздержимся, если не хотим посмеяться над чем-то подобным и в наше время.

Население

Физические законы накладывают свои ограничения, а природа человека свои. И так будет, пока человечество существует. Размножение — это глубоко укоренившийся инстинкт, навязанный ходом времени, который безжалостно отбрасывает генетический материал всех, кто пренебрегает им. Многие утверждают, что Земля уже перенаселена. В то время как нанотехнологии могут позволить нынешнему населению, а то и значительно увеличенному, жить на Земле более комфортно, возможности Земли по-прежнему будут ограничены.

Нормы человеческой жизни основаны на древних закономерностях: высокие показатели младенческой или детской смертности были фактами жизни на протяжении тысячелетий, и появление многих, многих детей было способом обеспечить выживание одного или двух человек для работы на ферме и заботы о престарелых родителях. Большие семьи естественно стали традиционными. Когда современная медицина и качественные продукты питания поменяли эти условия — а в культурном отношении это происходит практически мгновенно — поведение так быстро не меняется. Результатом является демографический бум в странах третьего мира. В западных странах, где было время для адаптации, огромные семья являются исключением.

Может показаться, что наша проблема решена. Молекулярное производство может сделать каждого богатым, и сегодня численность состоятельного населения стабильна или сокращается. Земля, с помощью передовых технологий, может поддерживать жизнь большего количества людей. И это позволит освоить огромное пространство и ресурсы мира за пределами Земли. Если бы это было правдой.

Если 99 процентов населения, став богатыми, сократят деторождение, то население действительно на некоторое время стабилизируется или сократится. Но народы не одинаковы. А если в оставшемся 1 проценте окажутся представители меньшинства, придерживающиеся других ценностей? Если у этого меньшинства будет темп прироста 5 процентов в год, то через девяносто пять лет они станут большинством, а за тысячу лет их население вырастет в 1,500,000,000,000,000,000,000 раз, если не скажутся пределы ресурсов или кто-нибудь не устроит геноцид. Отметим, что у гуттеритов Северной Америки, достаточно богатой религиозной группы, рассматривающей контроль над рождаемостью как грех, а высокую рождаемость как

благословение, прирост населения в среднем десять детей на одну женщину. Учитывая достаточное время, экспоненциальный рост даже самого маленького населения может потребить все доступные ресурсы.

Право на рождение детей часто рассматривается как основное право человека, о чем свидетельствует возмущение в связи с сообщениями о принудительных абортах в Китайской Народной Республике. Гуттериты и многие другие считают это частью своей свободы вероисповедания. Но что происходит, когда у родителей больше детей, чем они могут содержать? Решит ли это перераспределение? Если рождаемость не будет принудительно сокращена, а ресурсы принудительно и многократно перераспределятся так, чтобы у каждого человека была примерно равная доля, то она будет неуклонно сокращаться со временем. Даже с учетом самых оптимистичных предположений относительно имеющихся ресурсов при политике перераспределения ресурсов и неограниченного воспроизводства доход на человека в конечном итоге окажется недостаточным для поддержания жизни. Этой политики следует избегать, потому что, если ее придерживаться, она погубит всех.

Как только мы даем понять, что любое существо имеет право на определенные права — будь то человеческий ребенок, животное или какой-нибудь будущий искусственный интеллект, — возникает вопрос о том, кто несет ответственность за предоставление ресурсов для поддержания его существования, если оно не может содержать себя. Приведенный выше аргумент указывает на то, что политика принуждения со стороны некой центральной власти, направленная на то, чтобы заставить все население поддерживать экспоненциальный рост населения, рано или поздно приведет к катастрофе. В конечном счете, эта ответственность должна лежать на создателе искусственного интеллекта, владельце домашнего животного, родителях ребенка. Никакая новая технология не может волшебным образом снять ограничения, налагаемые естественными законами, и тем самым снять бремя ответственности с человека.

Решения вызывают проблемы

Каждый раз, когда технология решает какую-то проблему, она тут же создает новые. Это, конечно, не означает, что изменения ничего не меняют или ухудшают ситуацию. Вакцины Солка и Сабина от полиомиелита сделали ненужным изготовление железного легкого, а карманный калькулятор погубил производство логарифмических линеек, но эти достижения оправдали некоторую экономическую корректировку.

Молекулярное производство и нанотехнологии принесут огромные изменения, требуя от нас гораздо большей способности адаптироваться. Мы не должны удивляться, когда довольно полезные изобретения делают кого-то несчастным. Наша жизнь в основном состоит из проблем. Если мы сможем решить многие из них, наша жизнь изменится, но возникнут новые. В этом разделе описываются некоторые проблемы, которые принесут изменения и возможная адаптация к ним. Но мы только задаем вопросы, а не предлагаем решения.

Изменение вызывает проблемы

Молекулярное производство дает возможность радикальных изменений средств производства, более фундаментальных, чем возникновение промышленности или сельского хозяйства. Наши экономические и социальные структуры развивались в условиях, которых больше не будет.

Как мы будем реагировать на изменения в нашей работе и жизни? Нанотехнология окажет сильное влияние на многие области, включая экономические, промышленные и социальные. Что говорят нам о наступающем в подобных обстоятельствах будущем исторические примеры?

Любая мощная технология с широким применением кардинальным образом меняет жизнь, и нанотехнологии не станут исключением. В зависимости от точки зрения, это может звучать привлекательно или тревожно, но, скорее всего, нам будет непривычно.

Однако, несмотря на многие прогнозы, нанотехнологии могут привести к сравнительно комфортным изменениям в XXI веке. Наиболее часто прогнозируемыми изменениями в будущем, не учитывая нанотехнологии, были экологическая катастрофа, нехватка ресурсов, экономический коллапс и скатывание к нищете. Рост нанотехнологий предложит альтернативу — зеленое богатство — однако это приведет к большим изменения привычной жизни уже в ближайшие десятилетия.

Время быстрых технологических изменений сбивает с толку. На протяжении большей части существования человечества люди жили по стандартной схеме. Они учились жить так, как жили их родители — заниматься охотой и собирательством, позже работе на ферме — любые изменения были небольшими и постепенными. Знание прошлого было надежным руководством к будущему.

Внезапные изменения, когда они действительно происходили, были разрушительными: это и вторжения, и стихийные бедствия. С этими внезапными переменами боролись, восстанавливали, что могли, или просто старались выжить. Крупные перемены по собственному выбору вводили редко, а радикальные нововведения, как правило, вели к худшему: старые способы, по крайней мере, обеспечивали выживание предков, а новые — нет. Это сделало культуру консервативной.

Вполне естественно, что и сейчас делается все, чтобы препятствовать возможным переменам, но прежде чем предпринимать такие усилия, имеет смысл изучить историю и

разобраться, какие методы работают, а какие нет. Единственными примерами успешных борцов с изменениями были сообщества, которые создавали и поддерживали барьеры, изолируя свой социум от влияния внешнего мира в социальном, культурном и технологическом плане. В течение двух веков до 1854 года Япония пресекала любые связи с внешним миром, следуя преднамеренной политике уединения. Лидеры Албании ограничивали контакты на протяжении многих лет; только недавно они начали открываться.

Попытки изоляции в меньших масштабах работали лучше, когда они были добровольными, а не продиктованными правительством. Сегодня в пределах гавайской островной цепи есть крошечный частный остров Ниихау, длиной 16 миль и шириной 6 миль, который намеренно сохраняется как заповедник гавайского образа жизни девятнадцатого века. Более двухсот чистокровных гавайцев там говорят на гавайском языке и не пользуются телефонами, сантехникой, телевидением и электричеством (только в школе). У амишей Пенсильвании нет никакого окружающего океана, чтобы помочь сохранить их изоляцию, но вместо этого они полагаются на жесткие социальные, религиозные и технологические правила, нацеленные на то, чтобы не допустить влияния внешней технологии и культуры, сохраняя свою общность; покинувшие общину, назад не принимаются.

В национальном масштабе попытки ограничить свое развитие чем-то одним — или социальным, или технологическим прогрессом — не увенчались успехом. В течение десятилетий Советский Союз и страны Восточного блока приветствовали западные технологии, но пытались ввести жесткие ограничения на перемещение людей, идей и товаров. Тем не менее, нелегальная музыка, мысли, литература и другие знания все равно проникали, как и в исламские страны.

Борьба с технологическими изменениями в обществе в целом большого успеха не имела, особенно, когда эти изменения предоставляли какой-то большой группе то, чего они хотели. Самые известные борцы с технологическими изменениями — луддиты — оказались неудачниками. Они разбивали «автоматизированные» ткацкие станки, которые заменяли старые ручные во время первой промышленной революции в Англии, но люди хотели получать доступную одежду, и уничтожение станков в одном месте просто перемещало бизнес в другое место. Изменения иногда откладывались, например, когда более поздняя группа под лозунгом «Капитан Свинг» в 1830 году разбила сотни молотильных машин на обширной территории южной Англии. Им

удалось сохранить старые трудоемкие способы уборки урожая для целого поколения.

В предыдущие века, когда мир был менее тесно связан с международной торговлей, коммуникациями и транспортом, задержки на годы и даже десятилетия могли быть вызваны насилием или законными маневрами, такими как тарифы, торговые барьеры, правила или прямой запрет. В настоящее время попытки остановить или отложить изменения менее успешны, дело в том, что сейчас технологии распространяются между странами почти так же легко, как это делают люди, а путешествия настолько упростились, что каждый год 25 миллионов человек пересекают Атлантику. Впрочем, противники с переменами обнаруживают, что со временем проблемы только усиливаются. Продукция, изготовленная с использованием старых дорогостоящих технологий, неконкурентоспособна. Невозможно вернуть «старые рабочие места»: они больше не нужны. Но старые привычки отмирают с трудом, и сегодня перспективы технологических изменений продолжают сопровождаться негативными откликами — игнорируя, отрицая и противодействуя им. Общества, которые боролись с переменами, как это было в Великобритании, отстали в облаке угольного дыма.

Почему луддиты отреагировали так бурно? Возможно, их реакцию можно объяснить тремя факторами: во-первых, перемена в их жизни оказалась внезапной и радикальной; во-вторых, она затронула большую группу людей в одно время и в одной области; и в-третьих, в мире, не подготовленном к быстрым технологическим изменениям, не было никакой социальной системы помощи безработным. В то время как местная экономика, возможно, могла бы использовать поток голодных уволенных работников, но ей не хватило размаха и разнообразия, необходимых для быстрого предоставления других вариантов занятости большому числу безработных.

Но уже в XX веке общество по необходимости стало знкачительно лучше адаптироваться к изменениям. Это было необходимо, потому что не способные к переменам сообщества быстро отстают в развитии. В прежние времена стабильного сельскохозяйственного развития не было необходимости в таких организациях, как «Consumer Reports», изучающей и оценивающей новые продукты, или в таких регуляторах, как Агентство по охране окружающей среды, чтобы следить за возникающими новыми опасностями. Мы развивали потребности, и мы развивали институты контроля. Эти механизмы представляют собой важную адаптацию не столько к технологиям двадцатого века, сколько к

постоянным изменениям технологий в течение двадцатого века. Есть большие возможности для совершенствования подхода, но они, пожалуй, могут стать основой и для приспособления к следующему столетию.

Но даже если появятся идеальные организации для смягчения возможных потрясений и предотвращения злоупотреблений, проблемы все равно возникнут. Само по себе изменение производства — для увеличения благосостояния — создаст новые проблемы.

Чистое, децентрализованное производство вызывает проблемы

На протяжении веков, как представляется, растет тенденция к централизации, начиная с возникновения заводов и появления промышленных городов. Движущей силой этого была высокая стоимость машин и заводского производства, необходимость располагаться рядом с источниками энергии, непрактичность транспортировки между многими небольшими, рассредоточенными участками и необходимость личного общения.

Начиная с первой промышленной революции, на фабриках работало большое количество людей в одном месте, что привело к перенаселению и сделало местную экономику зависимой от одной отрасли, а иногда и от одной компании. Дорогостоящее оборудование требовало специальных мест для текстильного производства, в отличии от кустарной промышленности, где одинокая женщина могла зарабатывать на жизнь чесанием шерсти и прядением нити на прялке (объясняя происхождение термина старая дева). К 1930-м годам вера в преимущество централизации и централизованного планирования — предполагающих эффективность и экономию — привела к общенациональным или континентальным экспериментам по централизации. Но за последнее десятилетие эти масштабные эксперименты были прекращены, начиная с приватизации Британией национализированных коммунальных предприятий и заканчивая началом возвращения к рыночной системе в странах Восточной Европы.

Поскольку старые ограничения на транспортировку, источники энергии и связь упали, бизнес теперь децентрализуется. В период с 1981 по 1986 год компании Forbes 500 сократили своих сотрудников на 1,8 миллиона человек. Но за те же годы общее число гражданских рабочих мест увеличилось на 9,2 млн. Начинающие компании создали 14 миллионов рабочих мест, малые еще 4,5 миллиона. Телекоммуникации процветают, как и новые предприятия, независимые профессионалы и кустарные производства.

Мы также видели возрождение небольших, но очень разнообразных магазинов: по продаже изысканной еды, особых этнических, специализирующихся на поставках чая и кофе, органического и здорового питания, свежей выпечки, йогурта, мороженого для гурманов. А есть еще магазины с

круглосуточным доступом и торгующие фасованными продуктами и закусками. Эти магазины — проявление фундаментальных изменений: в какой-то момент оказалось, что мы хотим потреблять не стандартный товар по более дешевой цене, а специальные вещи, отвечающие нашему индивидуальному вкусу и потребностям.

Тенденция перехода к передовым технологиям, похоже, не связана больше с централизацией. Нанотехнологии противостоят этой тенденции или ускорят ее? Сокращая стоимость оборудования, уменьшая потребность в большом количестве людей для производства продукции и предоставляя больше возможностей для производства индивидуальных товаров, нужных людям, нанотехнологии, вероятно, продолжат тенденцию двадцатого века к децентрализации. Результаты, вне всякого сомнения, будут разрушительными для существующих предприятий.

Компьютерная индустрия, возможно, дает представление о том, что может произойти, когда нанотехнологии позволят снизить затраты. Для создания программного обеспечения часто достаточно небольшого помещения. Когда ваше оборудование дешевое — недорогие ПК, построенные на недорогих микросхемах — вы можете создать продукт, вложив немного изобретательности и человеческого труда, так появляется новая отрасль, требующая минимальных затрат.

В 1900 году, когда автомобили были простыми в изготовлении, появилось много автопроизводителей. К 1980-м годам, если вы не являетесь промышленным гигантом, таким как General Motors или Ford, Honda или Nissan, вы должны быть Джоном Делореаном, чтобы получить шанс приобрести капитал и поучаствовать в этом бизнесе. Если молекулярное производство сможет сократить капитальные затраты на производство автомобилей или другого оборудования, требующего больших производственных затрат, то мы увидим, как возникнут гаражно-цеховые предприятия, предлагающие новые продукты, и нанимающие работников вдали от современных промышленных центров точно так же, как персональный компьютер разрушил господство мейнфреймов.

Американская мечта — стать предпринимателем, и технологические тенденции двадцатого века показывают, что это возможно. Нанотехнологии, вероятно, только подтверждают это. Однако в одной области тенденция конца двадцатого века была направлена на центролизацию. Страны Западной Европы находятся в процессе объединения под единым сводом экономических правил, и страны Восточной Европы стремятся

присоединиться к ним. Все больше наднациональных и транснациональных организаций связывают мир воедино. Рост торговли стимулирует экономическую интеграцию.

Молекулярное производство будет работать против этой тенденции, поощряя радикальную децентрализацию экономической деятельности. Это поможет группам, которые не хотят подчиняться наступающим изменениям, позволяя им вести себя независимо от экономического влияния внешнего мира, и самим выбирать, какие технологии им использовать. Но это точно также поможет группам, которые хотят освободиться от политического влияния международного сообщества. Экономические санкции будут бессильны против стран, которые для поддержания высокого уровня жизни не нуждаются ни в импорте, ни в экспорте. В этом случае экспортные ограничения не смогут им помешать наращивать военную мощь.

Ослабляя торговое сотрудничество, молекулярное производство угрожает ослабить международные связи. Однако сохранение их позволит решить проблемы контроля над вооружениями, обостренные самим молекулярным производством. В ближайшие годы эта проблема, усиленная неизбежной децентрализацией, может стать серьезной.

Даже богатство и досуг вызывают проблемы

Лестер Милбрат, профессор социологии и политологии, отмечает: «Нанотехнологии создадут проблему того, как осмысленно и постоянно занять свободное время людей, которым не нужно больше много работать, чтобы обеспечить себя необходимыми жизненными благами. Наше общество никогда раньше не сталкивалось с этой проблемой, и неясно, какая социальная перестройка потребуется для того, чтобы общество могло существовать в этих условиях. Мы сталкиваемся с очень глубокой социальной проблемой».

Человечество редко сталкивалось с тем, что антропологи называют «экономикой изобилия». Индейские племена Тихоокеанского Северо-Запада были одними из немногих. Руфь Бенедикт в своей классической книге «Образцы культуры» написала: «Их цивилизация была построена на достаточном количестве товаров, неисчерпаемых и полученных без чрезмерных затрат труда». Квакиутлы прославились своими «горшками»: состязаниями, в которых они стремились опозорить своих соперников, накапливая на них больше подарков, чем те могли когда-либо вернуть. Это ритуальное празднество с приношением даров часто готовилось целый год и длились несколько дней, а иногда заканчивалось разрушением целых зданий. Это было, безусловно, чем-то вроде «не отставать от Джонсов».

Что будет мотивировать нас, когда мы достигнем экономики изобилия? Что мы будем считать стоящими целями? Увеличение знаний, новое искусство, развитие философии, устранение человеческих и планетарных бед? Сможем ли мы создать лучший, более мудрый мир или погрузимся в скуку и будем мучаться, понимая, что у нас есть все, и ничего больше не нужно? Если скука выйдет из-под контроля, то любое появление богатых спонсоров, стремящихся превзойти друг друга, одаряющих искусство, помогающих бедным и совершающих другие добрые дела ради престижа, будет приветствоваться.

Что произойдет, если продолжительность жизни продолжит увеличиваться, а время, необходимое для заработка, уменьшится? Даже сегодня есть люди, которые, столкнувшись с перспективой значительно продлить свою жизнь, заявляют, что не могут представить, что они будут делать со всем этим временем. Этот ответ будет трудно понять. Понадобится тысяча лет, чтобы пройти по всем дорогам мира. Еще тысячи лет, чтобы прочитать

все книги в мире. И еще десять тысяч лет, чтобы пообщаться за обедом с каждым из людей в мире — но вкусы различаются, и даже несколько десятилетий плохого телевидения могут заставить любого человека мечтать о спасении в могиле.

Изменение занятости вызывает проблемы

Главной проблемой, и, конечно, единственной областью величайших потрясений, является занятость (которую иногда трудно отличить от досуга). Когда-то у людей был небольшой выбор работы. Чтобы добыть себе пропитание, большинству приходилось работать на единственной доступной работе: крестьянском хозяйстве. Но все изменится, у людей будет обширный выбор работы: они могут обеспечивать свои потребности и вести разнообразный образ жизни, делая то, что им нравится. Сегодня мы находимся примерно на полпути между этими крайностями. В странах с развитой экономикой многие профессии считаются достаточно полезными, чтобы богатые люди предлагали адекватный заработок в обмен на результат. Сейчас некоторые люди могут зарабатывать на жизнь тем, что им нравится — это работа или отдых?

Влияние нанотехнологий на структуру занятости будет зависеть от того, когда они появится. Современная демография показывает сокращение количества молодых людей, пополняющих трудовые резервы. В сельском хозяйстве, на конвейере и на начальных этапах работы ощущается нехватка рабочей силы, и не видно, что ситуация изменится. Если эти тенденции сохранятся, нанотехнологии могут появиться в условиях нехватки работников. Если это произойдет достаточно поздно, они могут конкурировать с отраслями, которые уже почти полностью автоматизированы; «замена работников», в данном случае, может означать замену промышленного робота наномашиной.

В последнее время структура занятости радикально изменилась. Сто пятьдесят лет назад Соединенные Штаты были аграрной страной — 69 процентов всех людей работали на земле, а остальные в промышленности, занимаясь строительством паровых локомотивов для компании Болдуина или дублением кожи для гигантской Центральной Кожевенной монополии. К началу двадцатого века занятость в сельском хозяйстве начала сокращаться, но увеличивалась производительность труда; большинство людей работало в промышленности, и начал расти крошечный сектор информации и услуг. Сегодня картина изменилась: 69 процентов занятых американцев работают в сфере информации или услуг, только 28 процентов в промышленном производстве и лишь 3 процента — в сельском хозяйстве. Эта крошечная часть кормит остальные 97 процентов американцев, экспортирует огромные объемы продовольствия в другие страны

и получает субсидии и платежи за поддержку цен, чтобы остановить их рост для еще большего количества продовольствия. Производство, даже без нанотехнологий, похоже, движется к аналогичному состоянию.

С постоянно уменьшающимся процентом населения, работающего на производстве, мы имеем в личном пользовании вещи, которые когда-то были доступны только королям и высшей знати. Тем не менее, у нас есть несколько костюмов, фотографии членов семьи, мы слушаем любимую музыку, пользуемся личной спальней и услугами тренера, следящего за нашим физическим состоянием, — все это теперь рассматривается как самые насущные потребности жизни. Возможно, нам удастся приспособиться к еще большему достатку при еще меньших затратах труда, но такое развитие событий, несомненно, вызовет проблемы. В мире, где нанотехнологии еще больше сокращают потребность в рабочих в сельском хозяйстве и производстве, будет задан вопрос: «какие рабочие места остаются для людей, когда еда, одежда и жилье становятся очень дешевыми»?

И снова XX век дает некоторые ориентиры. Поскольку технология привела к снижению затрат за счет эффективного производства многих единиц идентичного товара, люди начали требовать изготовления их на заказ для удовлетворения индивидуальных потребностей или предпочтений. В результате в производстве товаров на заказ появляется все больше рабочих мест. Сегодня в большом и постоянно меняющемся ассортименте представлены полуфабрикаты, которые должны помочь нам удовлетворять потребности или отвечать нашему вкусу. Это дизайнерское постельное белье, готовая одежда, косметика, легковые автомобили, грузовики, транспортные средства для отдыха, мебель, ковровое покрытие, обувь, телевизоры, игрушки, спортивный инвентарь, стиральные машины, микроволновые печи, кухонные комбайны, хлебопечки, макаронники, домашние компьютеры, телефоны, автоответчики.

Столь же разнообразно сказочное богатство и разнообразие информации, произведенной в двадцатом веке. Информационные продукты являются важным фактором в экономике: американцы покупают 2,5 миллиарда книг, 6 миллиардов журналов и 20 миллиардов газет каждый год. В последние годы были основаны и запущены новые журналы, которые выпускаются каждый рабочий день. Осмотр хорошо укомплектованной журнальной стойки только намекает на богатство узкоспециализированных изданий, каждое из которых сосредоточено на специализированном интересе: катании на лыжах с хотдогами, нежирной кухни для гурманов, путешествии по Аризоне,

интересах пользователей персональных компьютеров, а также тематические журналы о здоровье, отдыхе, психологии, науке, политике, кинозвездах и рок-звездах, музыке, охоте, рыбалке, играх, искусстве, моде, красоте, антиквариате, компьютерах, автомобилях, оружии, борьбе.

Кинематограф зарождался как сборище независимых производителей, которые объединялись в великие студии 1930-х годов. В последнее время преобладали тенденции децентрализации и диверсификации. В настоящее время расширяется производство развлекательных фильмов, распространяемых с помощью сетевого телевидения, кабельных каналов, частных сетей, видеокассет, музыкальных клипов. Независимым производителям помогают технологические инновации кабельного телевидения, спутникового вещания, технологии видеокассет, лазерных дисков, видеокамер.

Искусство расцвело, теперь новым спонсором искусств стала широкая публика. Любой художник или вид искусства, который сумел найти свой рынок и удовлетворить вкусы потребителей, в двадцатом веке процветал. Не только традиционное искусство актеров, писателей, музыкантов и художников, но и все формы «домашнего» мастерства развились до беспрецедентного уровня: ландшафтный дизайн и дизайн интерьера, дизайн одежды, косметика, парикмахерское дело, архитектура, свадебный консалтинг.

Этим требованиям соответствуют некоторые «рабочие и информационные» профессии, появившиеся в конце двадцатого века. «Сервисные» службы предоставляют множество услуг по оказанию помощи другим людям: от ухода за больными и продаж до ремонта компьютеров. На «информационных» рабочих местах, которые, согласно прогнозам, в следующем десятилетии в процентном отношении будут расти особенно быстро, люди находят, оценивают, анализируют и создают информацию. Обозреватель журнала или продюсер телевизионных новостей, очевидно, занимается «информационной» работой. Но это и программисты, стряпчие, юристы, бухгалтеры, финансовые аналитики, кредитные консультанты, психологи, библиотекари, менеджеры, инженеры, биологи, турагенты и учителя.

«Все чаще, — пишет журнал Forbes, — люди больше не просто рабочие, они образованные профессионалы, у которых самые важные орудия труда находятся в головах. Их увольнение или отстранение от работы, может нанести им эмоциональный и материальный ущерб. Но это не лишает их призвания, как это произошло бы с фермером, изгнанным с его недавно засеянной земли. Веками рабочие были полностью зависимы от конкретного

производства. Современные занятия обычно предоставляют людям больше независимости. И большую мобильность, чем в прошлом».

Человеческие навыки, которыми владеют люди, будут цениться и в будущем: управлять сложным производством, обеспечивать творческий подход, настраивать вещи для других людей, помогать людям решать проблемы, предоставлять старые услуги в новых условиях, обучать, развлекать и принимать решения. Можно предположить, что многие сферы услуг и информации двадцатого века будут продолжать развиваться и существовать в мире с нанотехнологиями. Труднее представить себе, какие появятся новые отрасли, когда наши возможности возрастут, а затраты снизятся.

Наряду со старым экономическим законом спроса и предложения действует еще один определяющий фактор: влияние ценового спроса. Спрос людей к чему-то «эластичен»: он расширяется или сжимается, когда стоимость чего-то ценного падает или увеличивается. Если цена полета в Европу составляет пятьсот долларов, европейские каникулы устроят себе больше людей, а если пять тысяч долларов — меньше. Когда вам приходилось нанимать высококвалифицированного математика для решения уравнений, вычисления были медленными и дорогими. Люди отказывались от такой работы, если не обязаны были ее сделать. Сегодня компьютеры осуществляют расчеты дешево и автоматически. Таким образом, теперь предприятия занимаются сложным финансовым моделированием, химики разрабатывают молекулы белка, студенты вычисляют орбитальные траектории для космических кораблей, дети играют в видеоигры, режиссеры используют еще более удивительные спецэффекты, а мультфильмы — практически вымершие из-за высоких затрат на рабочую силу — вернулись в кинотеатры, потому, что компьютеры делают их дешево. Нанотехнологии предложат новые, доступные возможности и для других людей. Сегодня так же сложно предсказать, какие новые отрасли будут изобретены, как создатели компьютера ENIAC не могли предсказать появление дешевых портативных игровых приставок для детей.

Таким образом, нанотехнологии, скорее всего, не вызовут резкой безработицы, а продолжат тенденцию, наблюдаемую сегодня, сокращая рабочие места, которые можно автоматизировать, и создавая рабочие места, где жизненно важен человеческий подход. Но истинные возможности, как всегда в современном мире, не поддаются прогнозированию.

Изменения нарушают планы

Серьезные сдвиги в демографии всегда вызывают сбои. Даже когда мы знаем, что они неизбежны, мы никогда к ним не готовимся.

Наши планы основаны на ожиданиях того, что произойдет. Если все идет не так, как ожидалось, мы обнаруживаем, что наши надежды рухнули. Недвижимость в Хьюстоне была ценной и выглядела чрезвычайно привлекательной, когда были хорошие времена для нефтяного бизнеса. Когда состояние нефтяного бизнеса изменилось, оказалось, что недвижимости в Хьюстоне слишком много, цена ее завышена, и многие миллионы долларов были потеряны.

Увеличение продолжительности жизни подталкивает людей строить долгосрочные планы, но быстрые темпы изменений требуют делать краткосрочные инвестиции. Хаотичность развития технологий и денежно-кредитной политики правительства еще больше сократили временные горизонты. Бизнесмены когда-то регулярно строили заводы с тридцатилетним сроком полезного использования. Сегодня скорость изменения слишком высока, а неопределенность в отношении инфляции и потенциальных изменений в налоговом законодательстве слишком велика, чтобы такие инвестиции имели смысл. Если изменения будут происходить еще быстрее, это еще больше сократит временные горизонты.

Правительства взяли на себя бремя заглядывать в будущее, а служба социального обеспечения переживает не лучшие времена. Когда Отто фон Бисмарк, железный канцлер Германии, предложил концепцию гарантированной пенсии по старости, это был циничный умный и недорогой способ завоевать популярность среди населения. В те годы мало людей доживали до шестидесяти пяти лет, да и суммы, выплачиваемые в виде пенсий, были ничтожными. После наблюдения за немецким экспериментом в течение нескольких лет, другие правительства последовали этому примеру. Никто из них не ожидал, что наступит такой мир, как наш, где средняя продолжительность жизни новорожденной девочки, родившейся в Соединенных Штатах, составит 78,4 года — вдвое больше, чем у Бисмарка, — и даже эта оценка основана на ошибочном предположении, что ее медицинское обслуживание будет не лучше, чем у ее прабабушки.

В настоящее время служба социального обеспечения используют две модели: одну они называют «позитивной», а другую — «негативной». В «позитивной» модели люди работают

как собаки до старости, выходят на пенсию и быстро умирают — по-видимому, до того, как у них будет возможность получить существенное социальное обеспечение или медицинские пособия. В «негативной» модели люди рано выходят на пенсию, заболевают болезнями, требующими медицинского вмешательства, а затем проживают долгое время, посещая врача и оставаясь в больнице в течение этих лет. Планы, основанные на этих моделях, должны быть сорваны. В лучшем, более реалистичном сценарии, люди должны жить и обеспечивать себя в течение длительного времени, поскольку с болезнями можно легко и недорого справиться. Существующих социальных пособий должно хватать для обеспечения определенного уровня жизни — на еду, жилье, транспорт и так далее. В будущем, где материальных благ будет достаточно, эти траты будет легко обеспечить, и нынешние прогнозы экономического бедствия, вызванного старением населения, покажутся странными.

Справиться с переменами

В семидесятые годы автор Элвин Тоффлер выпустил книгу «Шок будущего», в которой рассказал о том, насколько катастрофическими окажутся для людей неминуемые быстрые перемены. Книга стала бестселлером, но неужели изменения, происшедшие за последнее десятилетие, шокировали население? Похоже, что большинство людей довольно спокойно пережили последние два десятилетия, так и не испытав обещанных потрясений. Вместо того, чтобы испытывать шок, столкнувшись с новыми технологиями, они раздражены загрязнением окружающей среды и проблемами с транспортом.

Значит ли это, что Тоффлер ошибался в предсказании будущего шока? Нет. Конечно, это правда, что в последние двадцать лет технологии быстро развиваются во многих областях. Но рассмотрим частную жизнь обычного человека: как ускорившийся технический прогресс проявился в его доме? Многое изменилось, но, как правило, постепенно и незаметно, в отличие от начала столетия, когда изменения были очень даже заметны. Электрические фонари и приборы, автомобили, телефоны, самолеты, радио и телевидение повлияли на личную жизнь почти каждого. Жизнь некоторых людей начиналась поездками на лошадях, а продолжилась просмотром посадок на Луну по телевизору.

С другой стороны, в последние двадцать лет новые технологии стали попадать в частный дом очень медленно. Видеомагнитофон и микроволновая печь не кажутся такими революционными, как предыдущие изобретения. Телефонные автоответчики полезны, но не вызвали серьезных изменений в образе жизни. Факсимильные аппараты удобны, но они очень похожи на очень быструю почту, и в то время, когда я об этом пишу, в большинстве домов факсимильных аппаратов пока еще нет. Поэтому неудивительно, что в последнее время будущее шокировало обычного человека не очень сильно. Новые лекарства, принимаемые в виде таблеток, могут быть радикально улучшены, но они выглядят так же, как и прежние. Компьютеризированные счета, приходящие по почте, не более удивительны, чем старые, подготовленные человеком.

Такая ситуация вряд ли продлится долго. Как долго технологии во многих областях смогут развиваться так же быстро, не оказывая существенного влияния на наш образ жизни? Последние три десятилетия предоставили передышку от будущего шока; у людей появилась возможность отдышаться. Но

когда придут нанотехнологии, вызовет ли наступившее будущее шок?

Некоторые группы общества уже сегодня получают опыт борьбы с быстро наступающим технологическим прогрессом. Наиболее остро это касается пользователей компьютеров, где машина двухлетнего возраста считается устаревшей, и программное обеспечение должно обновляться каждые несколько месяцев, чтобы успеть за новыми разработками.

Но оказался ли этот потрясающий прогресс головокружительным или подавляющим? Не для потребителя — наоборот, компьютеры стали проще в использовании. В 1960-х годах новая математика, которая была введена в американских начальных школах и средних школах, включала подробное изучение не только десятеричных чисел, но и двоичных, и основанных на других системах счисления. Это должно было подготовить «взрослых завтрашнего дня» к «веку компьютеров», «когда мы все будем писать компьютерные программы на ассемблере в двоичном коде». Но клиенты сейчас покупают готовое программное обеспечение, а не пишут его сами — им вообще не нужно иметь дело с компьютерными языками, а тем более примитивным языком ассемблером. Быстрое увеличение скорости компьютера помогло упростить использование компьютеров.

Что-то подобное происходило много раз и прежде: автомобили начинали с внешней заводной ручки, а затем появились стартеры, ручки которых нужно было дергать, не покидая места водителя. Теперь стартеры работают незаметно при повороте ключа в замке зажигания. История усовершенствований, безусловно, будет продолжена. Как правило, люди адаптируются к технологии, но, в конечном итоге, любая технология адаптируется к нам. Чем гибче и мощнее технология, тем легче она будет адаптироваться.

Видимые на расстоянии, казалось бы, тривиальные модели адаптации образуют часть более крупного процесса, который занял все прошлое столетие: западный мир начал изобретать механизмы для управления миром постоянных изменений. Наши механизмы ни в коем случае не совершенны и не безопасны, что может засвидетельствовать любой безработный. Агентства по трудоустройству и охотники за головами для корпораций, подыскивающих себе работников. Пособия по безработице и выходное пособие для облегчения перехода на другую работу. Обучение на рабочем месте, непрерывное образование, переподготовка, специализированные семинары для повышения квалификации, профессиональные ассоциации, сетевое

взаимодействие, общественные ресурсы, государственные учебные программы и волонтерские агентства — это лишь некоторые из изобретений, связанных с изменениями и переходными процессами. Информационные службы для потребителей, регулирующие органы и экологические организации — другие. Самые эффективные будут действовать и дальше. Но, можно не сомневаться, что изобретут и другие способы приспособления.

Глава 12
Безопасность, несчастные случаи и злоупотребления

Прописная истина: почти любая технология подвержена использованию, неправильному использованию, злоупотреблениям и несчастным случаям. Чем мощнее технология при правильном использовании, тем опаснее она может быть при злоупотреблении. Любая мощная технология в руках человека может стать предметом несчастных случаев. Нанотехнологии и молекулярное производство не станут исключением. Действительно, если молекулярное производство заменит современную промышленность, и если его нанотехнологические продукты заменят большинство современных технологий, то почти все будущие аварии будут связаны с нанотехнологиями.

Известно, что в разнообразном, конкурентном мире любая относительно недорогая технология с огромным коммерческим, медицинским и военным потенциалом почти наверняка будет разработана и использована. Трудно представить сценарий (если не считать распада цивилизации), в котором нанотехнологии не появятся; это кажется неизбежным. Если это так, то с его проблемами, какими бы сложными они ни были, нужно бороться.

Как грузовики, самолеты, биотехнологии, ракеты, компьютеры, сапоги и теплая одежда, так и нанотехнологии могут использоваться и в мирных, и в агрессивных целях. В мирных целях (по определению) вред людям наносится либо случайно, либо неосознанно. В агрессивных целях вред наносится преднамеренно. При мирном развитии событий правильный вопрос, который следует задать: могут ли ошибающиеся люди доброй воли, преследуя нормальные человеческие цели, использовать нанотехнологии таким образом, чтобы снизить риск и вред для других? В агрессивном военном контексте следует задать другой вопрос — можем ли мы как-то сохранить мир? На первый вопрос ответим, конечно, «да», ответ на второй может вызвать тревогу.

В ходе этой дискуссии мы предполагаем, что большинство людей будут бдительны в вопросах, касающихся их личной безопасности, и что некоторые будут бдительны в вопросах, касающихся безопасности мира. В течение 1970-х люди, причастные к новым масштабным и долгосрочным проблемам

технологии, часто чувствовали себя изолированными и бессильными. Они, естественно, понимали, что технологии вышли из-под их контроля и попали в руки недальновидных и безответственных групп. Сегодня битва еще не закончена, но ситуация изменилась. Сейчас, когда возникает обеспокоенность по поводу новой, даже понятной технологии, намного легче получить шанс высказаться в СМИ, в судах и на политической арене. Совершенствование проявлений социального и политического контроля над технологиями является важной задачей. Существующие методы несовершенны, но они могут развиваться в правильных направлениях.

Хотя мы и призываем к бдительности, со временем она притупляется. Силы, необходимые для того, чтобы постоянно думать о долгосрочных проблемах, ограничены, поэтому их нужно использовать осторожно, а не растрачивать на тривиальные или иллюзорные проблемы. Часть нашей задачи в этой главе — помочь разобраться в проблемах, поднятых нанотехнологиями, чтобы можно было сосредоточить наше внимание на задачах которые должны быть решены, но могут и остаться не решенными.

Следующие несколько разделов посвящены несчастным случаям обычных видов, где преимущества обеспечения безопасности очевидны. В последующих разделах обсуждаются новые проблемы, достаточно сложные, чтобы мы могли предложить устраивающие всех решения.

Безопасность в обычной деятельности

Поскольку страны стали богаче, их люди живут дольше, несмотря на загрязнение окружающей среды и автомобильные аварии. Большее богатство означает более безопасные дороги, автомобили, дома и рабочие места. На протяжении всей истории новые технологии приносили новые риски, включая риски смерти, травм и вреда для окружающей среды, но предусмотрительные люди принимали новые технологии только тогда, когда находили приемлемое сочетание рисков и выгод. Несмотря на случайные серьезные ошибки, исторические примеры говорят о том, что люди преуспели в выборе технологий, которые снижают их личный риск. Это, конечно, так, иначе продолжительность нашей жизни снижалась бы.

Молекулярное производство и его продукты должны продолжить эту тенденцию, но не автоматически, а как результат постоянной бдительности людей, проявляющих осторожность при выборе технологий, которые они собираются использовать в своей повседневной жизни. Нанотехнологии обеспечат лучший контроль над производством и продукцией, а лучший контроль, как правило, обеспечивает большую безопасность. Нанотехнологии приведут к росту благосостояние, а безопасность — это форма благосостояния, которую люди ценят. Публичные обсуждения, тестирование продукции и правила безопасности являются стандартными частями этого процесса.

Безопасность дома

В обычных домашних авариях опасный продукт неправильно наносится, проливается или потребляется. Дома сегодня полны агрессивных и токсичных материалов для очистки канализации, растворения пятен, уничтожения насекомых и так далее. Слишком часто дети пьют их и умирают. С передовой технологией ни одна из этих задач не потребует применения таких активных и опасных химикатов. Очистка канализации может выполняться селективными наномашинами вместо агрессивных химикатов; насекомых можно уничтожить с помощью защищающих экосистему устройств, которые знают разницу между тараканом и человеком или божьей коровкой. Несомненно, смертельных несчастных случаев полностью избежать невозможно, но при осторожном и внимательном применении можно будет гарантировать, что использование нанотехнологий в домашнем хозяйстве более безопасно, чем прежние средства, что спасет много жизней.

Конечно, можно представить себе и случаи нарушения безопасности: нанотехнологии могут быть использованы и для того, чтобы сделать продукты гораздо более разрушительными, чем мы можем себе это представить, поскольку они могут быть использованы для усиления любого своего свойства. Такие продукты, вероятно, не будут широко распространены: даже сегодня нервно-паралитический газ может применяться как мощный пестицид, но он не продается для домашнего использования. Реальное размышление о грозящих опасностях требует относиться к ним, не забывая о здравом смысле.

Безопасность промышленности

Мы уже видели, как после технологического прорыва станут невозможны разливы нефти, поскольку прекратится использование нефти. То же самое можно будет сказать практически о любых современных промышленных авариях. Но как насчет аварий — разливов вредных веществ и тому подобному — с новыми технологиями? Вместо того, чтобы пытаться представить себе будущую технологию и аварию, которая может с ней случиться, лучше провести мысленный эксперимент, показывающий, какой может быть наша реакция. Пусть нефть все еще используется, что можно сделать для ликвидации ее разливов? Это поможет представить, как нанотехнологии могут быть использованы для борьбы с авариями.

Если на берегу появятся разливы нефти, специальные наномеханизмы могли бы отлично отделить нефть от песка, удалить нефть с камней и очистить сырую нефть от птичьих перьев и прилипших ракушек. Загрязнение нефтью — это проблема очистки, и нанотехнологии помогут в ее устранении.

Но почему нефть должна достигнуть берега? Экономичное производство позволило бы легко складировать оборудование для очистки вблизи всех основных транспортных маршрутов, а также вертолетные площадки, обеспечивающие быструю его доставку при первом аварийном вызове с танкера. Оборудование для очистки нефти, использующее нанотехнологии, вне всякого сомнения, может отлично откачать масло из воды еще до того, как оно достигнет берега.

Но почему нефть должна вытечь из танкера? Экономичное производство прочных материалов может изготовить бесшовные корпуса из волокнистых материалов гораздо более крепкими, чем стальные, с двойным, тройным или четырехкратным слоем. Умные материалы могут даже самостоятельно устранять течи. Подобные корпуса могут разбиваться о скалы с большой скоростью, не проливая нефть.

Но зачем кому-то перевозить сырую нефть через море? Даже если нефть все еще будет добываться (несмотря на недорогую солнечную энергию и топливо, получаемое с помощью солнечной энергии), эффективные системы обработки молекул могли бы преобразовать ее в чистое жидкое топливо непосредственно в скважине, а недорогие туннельные машины могли бы обеспечить маршруты для подземных трубопроводов.

Любое из этих новшеств уменьшит или устранит сегодняшнюю проблему с разливами нефти, и все они

осуществимы. Этот пример предлагает общую схему. Если нанотехнологии способны предоставить так много различных способов избежать разлива нефти или справиться с ним — одной из самых крупных и наиболее разрушительных для окружающей среды аварий, вызванных современной промышленностью, — она, вероятно, может быть аналогично использована и для ликвидации других промышленных аварий.

Самый простой подход — самый правильный: устранение всего, что напоминает современные промышленные установки и процессы. Переход от вредных для экологии буровых работ и огромных танкеров к небольшим энергетическим системам на основе солнечных батарей — характерный пример того, как могут использоваться нанотехнологии. Химическая промышленность сегодня это, как правило, заводы, оснащенные большими резервуарами для химикатов под давлением. Не удивительно, что они иногда допускают утечки, взрываются или горят. Благодаря нанотехнологиям химические заводы будут не нужны, поскольку молекулы могут преобразовываться в меньшем количестве, по мере необходимости, не требуя высоких температур, высокого давления или больших емкостей. Это не только предотвратит загрязнение окружающей среды, но и уменьшит риск несчастных случаев.

Безопасная медицина

Медицина тоже может стать безопаснее. Лекарства часто вызывают побочные эффекты, которые могут нанести организму непоправимый урон или даже убить. Наномедицина предложит другой способ лечения, исключающий введение в организм потенциально токсичных химических веществ. Часто нужно воздействовать только на одну цель: только желудок или, может быть, только язву. Лечение антибиотиками или противовирусными препаратами должно бороться с определенными бактериями или вирусами, а не повреждать что-либо еще. Когда медицина обзаведется совершенными иммунными машинами и устройствами для клеточной хирургии, это станет возможным.

Но как быть с медицинскими несчастными случаями и побочными эффектами? Молекулярное производство сделает возможным создание превосходных датчиков, способных сообщать медикам о последствиях приема нового лекарства, тем самым, улучшая его тестирование. Кроме того, они помогут контролировать любые негативные последствия лечения каждого пациента. Очень внимательно. Достаточно заметить, что несколько клеток повреждены, или что появились небольшие концентрации токсичных побочных продуктов, чтобы лечение было скорректировано.

Медицина на основе нанотехнологий будет способна решить эту проблему. С помощью биостазиса, даже самые тяжелые заболевания, вызванные неудачным лечением, могут быть приостановлены, пока разрабатывается лечение. Короче говоря, серьезные медицинские ошибки будут совершаться гораздо реже, и большинство их можно будет исправить.

Вывод, который следует из этих примеров о разливах нефти, химических заводах и последствиях медицинского лечения, прост. Сегодня наши сравнительно небольшие возможности и технологическая некомпетентность подталкивают нас к созданию и использованию относительно опасных и разрушительных устройств, систем и методов. Получив больше возможностей и освоив новые технологии, мы сможем выполнять то, что делаем сегодня (и будем делать еще какое-то время), с меньшим риском и меньшим ущербом для окружающей среды: одним словом, получим возможность делать больше и делать это лучше.

С помощью более контролируемых технологий и с достаточной степенью дальновидности и осторожности мы сможем лучше справляться с возможными ошибками. Это не

произойдет автоматически, но при нормальном подходе мы можем добиться, чтобы в будущем аварии были менее опасны и случались реже, чем в наше время.

Чрезвычайные происшествия

В предыдущем разделе обсуждались обычные аварии, которые могут произойти при использовании нанотехнологий ответственными, но подверженными ошибкам людьми. Однако нанотехнологии могут быть ответственны и за то, что называют «чрезвычайными происшествиями»: например, за несчастные случаи с участием самовоспроизводящихся машин. Можно представить себе устройство размером с бактерию, но более жесткое и почти всеядное. Оно сможет разлетаться как пыльца, и размножаться как бактерия, используя для питания любую органику: мы получим экологическую катастрофу беспрецедентных масштабов, которая может разрушить всю земную биосферу. Это действительно вызывает беспокойство, но может ли это произойти случайно?

Как создать большую проблему

Рассмотрим так называемый «сценарий Звездного пути», названный в честь эпизода «Звездный путь: Следующее поколение», в котором фигурировали размножающиеся «наниты». Он является, пожалуй, наиболее часто упоминаемой проблемой подобного сорта. В этом сценарии кто-то сначала вкладывает значительные инженерные усилия в проектирование и создание устройств, почти таких же, как только что описанные. Они размером с бактерию, всеядные, способны выживать в широком диапазоне естественных сред и создавать свои копии и имеющие всего несколько встроенных средств защиты — возможно, таймер, отключающий их через некоторое время, или что-то еще. Затем, случайно, таймер выходит из строя, или один из этих опасных репликаторов создает копию с неисправным таймером, и мы получаем беспрецедентную экологическую катастрофу.

Это было бы действительно опасно. Но обратите внимание, что этот сценарий катастрофы начинается с того, что кто-то создает высокопроизводительное устройство, которое является почти катастрофически опасным, но контролируется всего несколькими мерами защиты. Это было бы похоже на минирование вашего дома динамитом и использование предохранителя для защиты спускового крючка: последующий взрыв можно назвать несчастным случаем, но проблема не в механизме, обеспечивающем безопасность, а в установке динамита.

Нужно ли создавать нанотехнологический динамит? Стоит подумать, какой смысл в создании чего-то, напоминающего только что описанный опасный репликатор. (Обратите внимание, что мы сейчас пока рассматриваем несчастные случаи; преднамеренные акты агрессии — другой вопрос).

Как этого избежать

Что проще создать с нашей современной технологией, — автомобиль, работающий на бензине, или тот, который добывает себе топливо в лесу? Машину, разгуливающую по лесу, будет очень сложно спроектировать, она будет стоить дороже, и у нее будет больше деталей, способных сломаться. Схожая ситуация с нанотехнологиями.

Ральф Меркл из Исследовательского центра «Xerox» в Пало-Альто обсуждал этот вопрос на первой Форсайт-конференции по нанотехнологиям. Он объясняет: «Создать самовоспроизводящуюся систему, которая производит каждую необходимую деталь из природных материалов, трудно и неэкономично. Бактерии делают это, но в процессе они должны синтезировать все двадцать аминокислот и многие другие соединения, используя тщательно продуманные ферментные системы, разработанные специально для этой цели. Для бактерий, сталкивающихся с враждебным миром, самая важная способность — умение адаптироваться и реагировать на изменение окружающей среды, поскольку в противном случае они будут уничтожены.

Но на заводе-изготовителе, где заранее собраны достаточные запасы всех необходимых веществ, возможность синтезировать отдельные детали с нуля не только не нужна, но и вредна, поскольку требует дополнительное время и энергию, а также создает избыточные отходы. Даже если бы мы умели конструировать искусственные самовоспроизводящиеся системы, способные приспосабливаться, как и природные, негибкая и жесткая система лучше приспособлена к контролируемым заводским условиям, в которых она окажется, чем более сложная, более адаптируемая, но менее эффективная конструкция».

Более того, сценарий «Desert Rose Industries» показал, как фабрика широкого профиля может работать вообще без самовоспроизводящихся машин: молекулярное производство не требует их. Если они используются для каких-то конкретных целей, то, скорее всего, будут напоминать автомобили, собранные по особому заказу. Самовоспроизводящаяся молекулярная машина, созданная для промышленных целей (и сделанная настолько простой, насколько это возможно), будет плавать в контейнере специально отобранных химикатов. Как и в случае с автомобилем, лучшим сырьем для них, вероятно, будут химические вещества, которые обычно не встречаются в природе. Разумно придерживаться при конструировании простого правила:

никогда не создавать репликатор, который может использовать в качестве сырья абсолютно все, что встретится в природе.

Если мы будем следовать этому правилу, идея о том, что репликатор «сбежит» и размножится в дикой природе, будет столь же абсурдной, как и идея о том, что автомобиль сходит с ума и заправляется древесным соком. Проекты репликаторов или автомобилей, которые могли бы работать в условиях дикой природы, стали бы не просто вопросом замысла конструктора, а напряженных и длительных исследований и разработок, направленных на достижение этой цели. Случайные отказы и даже взрывы оборудования, конечно, происходят, но новые возможности не должны приводить к авариям.

Часто люди, когда впервые слышат о нанотехнологиях, а потом о «молекулярных машинах», «репликаторах», «нанокомпьютерах» и «наномашинах», которые уже существуют в природе, совершают простую психологическую ошибку. Она заключается в следующем: человек сваливает все эти понятия в одну кучу и считает, что речь идет об одном и том же. Результатом последующего осмысления является мифическая наномашина, которая делает все: это и репликатор, и суперкомпьютер, и лэндровер, она и ломтиками режет, и кубиками — не удивительно, что эта воображаемая наномашина выглядит неконтролируемо и опасно. При достаточном усилии, возможно, можно было бы построить и такую наномашину, но это очень сложно, да и не нужно.

Есть преимущества в создании систем молекулярного оборудования, которые могут использовать недорогие и распространенные химические вещества, и устройства, которые могли бы работать в природе, но эти машины не должны быть репликаторами. Такое предприятие, как «Desert Rose Industries», может быть спроектировано так, чтобы потреблять мало ресурсов, только электроэнергию солнечных батарей и молекулы воздуха, но при условии, что подобная установка не может выйти из-под контроля. Наномашины, созданные для поглощения загрязняющих веществ и других наружных работ, могут быть изготовлены на предприятиях подобных «Desert Rose Industries», а затем установлены там, где они необходимы.

Чрезвычайные происшествия заслуживают внимания, но если относиться к возможности их появления с достаточной осторожностью, их можно полностью избежать. Стимул к созданию чего-либо, напоминающего репликатор сценария «Звездного пути», незначителен, даже с военной точки зрения. Любые усилия по созданию такой вещи следует рассматривать не как использование нанотехнологий, а как злоупотребление.

Однако возможны другие злоупотребления, которые кажутся более вероятными и весьма опасными.

Главная опасность: злоупотребления

Главная опасность нанотехнологий — не несчастные случаи, а злоупотребления. Преимущества нанотехнологий в области безопасности при использовании с надлежащей осторожностью освободят часть нашего внимания для решения этой гораздо более сложной проблемы. Как отмечает Лестер Милбрат, «нанотехнологии обладают такой огромной силой, что их можно использовать для злых и разрушающих экологию целей так же легко, как и для добрых и сохраняющих экологию. Эта великая опасность потребует добиться уровня политического контроля, намного превышающего тот, который большинство стран способны осуществить. Мы должны столкнуться с потрясающей задачей социального обучения».

До сих пор мы в основном обсуждали то, как возросшие возможности будут служить конструктивным целям. Неудивительно, что потенциальные последствия введения новых технологий — за огромным исключением социальных и экономических потрясений — в основном положительные. Чистые, хорошо контролируемые, недорогие, передовые технологии, при применении с осторожностью, могут дать гораздо лучшие результаты, чем грязные, опасные, дорогостоящие и неэффективные технологии прошлого. Это не должно вызывать удивления, но это только половина истории. Другая половина — это применение тех же самых передовых технологий в разрушительных целях.

Читатели, считавшие, что все рассказанное нами слишком хорошо выглядит, чтобы быть правдой, могут вздохнуть с облегчением. Эта проблема, действительно, очень сложная.

Совместное управление

Молекулярное производство приведет к появлению более мощных технологий, но наша нынешняя грубая технология уже обладает огромным мировым потенциалом. Мы жили с этим потенциалом в течение десятилетий. В предстоящие годы нам необходимо будет укрепить институты, созданные для поддержания мировой безопасности.

Если большая часть политической власти в мире, а вместе с ней и большая часть полиции и военных сил признают, что в их личном интересе поддерживать мир и стабильность, тогда решение кажется возможным. Перспектива гонки вооружений с использованием нанотехнологий ужасна, и ее следует избегать любой ценой. На момент написания этой статьи окончание холодной войны дает хорошую надежду избежать этого кошмара. Джеймс К. Беннетт, предприниматель и специалист, занимающийся высокими технологиями, политолог, связанный с Центром конституционных проблем в технологии, предупреждает: «Передовые технологии, особенно предоставляющие такие широкие возможности, как нанотехнологии, создадут мощный запрос на их регулирование. Задача будет заключаться в создании достаточного контроля, который бы позволил не допустить злоупотребления технологиями со стороны жаждущих власти, не задушив при этом развитие и не создавая тоталитарного международного режима».

В ближайшие десятилетия борьба за предотвращение масштабного злоупотребления нанотехнологиями примет форму регулирования, контроля над вооружениями и антитеррористической деятельности. В области контроля над вооружениями нанотехнологии должны представлять сильную мотивацию для международного сотрудничества и для тесного взаимного контроля в форме совместных исследовательских программ.

Огромные производственные возможности молекулярного производства позволят в считанные дни перейти от прототипа разрабатываемого оружия к массовому его производству. Существуют и более экзотические опасности, могут быть созданы опасные наномашины, в том числе программируемые «микробы» (размножающиеся или не размножающиеся) для борьбы с микробами. Любая разработка подобных производств может привести к войне. В условиях, когда мир выглядит столь выгодным, а гонка вооружений — настолько опасной, контроль над вооружениями посредством совместного развития должен

выглядеть привлекательно. Но такой подход не будет легким или очевидным.

Терроризм не является насущной проблемой. Мы уже десятилетиями живем с ядерным оружием и нервно-паралитическим газом, который, в принципе, произвести несложно. На момент написания этой статьи ни один город не был уничтожен террористами, использующими эти средства, и ни разу не возникло реальной угрозы такого рода. Граждане Хиросимы и Нагасаки, как и курды в Ираке, стали жертвами ядерного и химического оружия, которым владеют правительства, а не небольшие группы. Поскольку нанотехнологии технологически более сложны, чем химические процедуры изготовления нервно-паралитического газа, нанотерроризм не должен быть главной проблемой.

Однако, чтобы опасные нанотехнологии были недоступны, требуется регулировать их использование. Если кто угодно будет свободно использовать молекулярное производство, то однажды, когда технологическая база улучшится, и проекты станут доступными для все большего числа наноустройств, кто-то где-то — хотя бы из-за чистой злости — выяснит, как объединить эти наноустройства для создания опасного репликатора, и запустит его. Однако почти наверняка скрыть это не удастся: в ходе естественного развития событий обязательно появятся протестующие, метающие камни, присылающие заминированные письма и взрывающие автомобили. Вероятно, злоупотребление нанотехнологиями будет замечено задолго до того, когда оно станет разрушительным, и это, по крайней мере, даст некоторое время, чтобы попытаться исправить ситуацию.

Нормативная тактика

Злоупотребление такого рода может быть отложено, на длительное время возможно, с помощью надлежащего регулирования. Цель не в том, чтобы ужесточить правила, чтобы людям приходилось их нарушать, если они захотят что-то сделать. Это поощрило бы несогласных, подпольную работу и неуважение к закону. Вместо этого, достаточно свободно устанавливать границы дозволенного, чтобы создавать небольшие трудности для законной работы, в то же время, затрудняя любую опасную деятельность. Здесь необходимо соблюсти тонкий баланс: те, кто боятся риска, будут пытаться применять грубые и репрессивные правила, а компании, естественно, попытаются ослабить или полностью избежать регулирования. Тем не менее, проблема должна быть решена, и это, кажется, лучшее направление для изучения.

При определенном подходе наномашины можно разделить на два класса: экспериментальные устройства и одобренные продукты. Одобренные продукты могут быть свободно доступны через специальные молекулярные производственные системы. А вот экспериментальные устройства должны пройти регулирующий контроль, после чего их можно будет распространять по доступной цене. Таким образом, запрос на нужный продукт может быть удовлетворен без нарушения правил безопасности.

Одобренные продукты должны включать (и превосходить их по качеству) полный спектр современных потребительских продуктов, начиная от персональных суперкомпьютеров с 3D-цветными дисплеями, и умных конструкционных материалов, заканчивая кроссовками с поистине удивительными свойствами. Основной стоимостью такого товара может быть гонорар конструктору. В книге «Двигатели творчества» (первая книга, которая исследует эту тему) эту стратегию по производству и распространению утвержденных продуктов называют «ограниченной системой ассемблеров».

Обратите внимание, и утвержденные продукты, и ограниченные ассемблеры, которые их создают, не способны делать свои копии и самовоспроизводиться. Ральф Меркл считает, что эту способность следует контролировать: «Самовоспроизводящиеся системы могут и должны надлежащим образом регулироваться. Однако, похоже, нет нужды беспокоиться об устройствах, которые лишены такой возможности. Как и для любого другого устройства, таким

системам нужны обеспечивающие их надлежащее использование законы, принятие которых не вызовет особых проблем». Для большинства продукции будут применяться нормальные медицинские, коммерческие и экологические стандарты; регулирующая их нормативная база уже существует.

Следует отметить, что у творческих людей появляются прекрасные возможности практически бесплатно экспериментировать с новой технологией, позволяя опробовать свои идеи без предварительного согласования с надзирающим комитетом. Удивительно, но и это кажется совместимым с безопасностью.

В мире нанотехнологий один кубический микрон — это большое пространство, в котором достаточно места для миллионов компонентов. Для многих целей несколько кубических микрон были бы внушительными лабораторными помещениями. Для устройства размером в микрон сантиметр — это огромное расстояние. Оградить такое устройство стеной толщиной в сантиметр, это все равно, что окружить человека стеной толщиной в несколько километров. Проникнуть за эту ограду было бы так же трудно. Кроме того, устройство микронного масштаба может быть мгновенно сожжено чем-то таким же маленьким, вроде искры статического электричества. Основываясь на подобных рассуждениях, в книге «Двигатели творчества» рассмотрена идея закрытой ассемблерной лаборатории, в которой исследователь мог бы построить что угодно, даже намеренно попытавшись спроектированное что-то опасное, и в то же время он не смог бы вытащить из своей микроскопической закрытой лаборатории что-либо, кроме информации.

С хорошей коммуникационной сетью исследователь или разработчик продукта из Техаса мог бы с легкостью проводить эксперименты в удаленной лаборатории в штате Мэн, за безопасностью и секретностью которых следили бы из швейцарского банка. Лаборатория будет нести ответственность перед своими клиентами за сохранение конфиденциальности работы и перед контролирующими органами за обеспечение того, чтобы ничего, кроме информации, не покидало лабораторию. Это позволило бы исследователям проводить любые небольшие эксперименты по своему желанию. Разумеется, за пределами закрытых лабораторий будут изготавливаться только утвержденные продукты. Хотя это, возможно, и не лучшая модель регулирования, но она демонстрирует один из способов, позволяющий сочетать свободу экспериментов со строгим контролем. Обеспечивая четкое разделение законной и

незаконной деятельности, можно было бы решить сложную проблему выявления и предотвращения исследований, цель которых нанесение ущерба.

Разумная политика должна будет найти баланс между риском частного злоупотребления технологиями и риском злоупотребления и контролем со стороны правительства. Производство недорогого оборудования для наблюдения может сделать контроль дешевле. Наблюдение может снизить некоторые риски в обществе, но действия самих наблюдателей часто отслеживается не очень хорошо. Установление границ надзора является сложной задачей, как для сегодняшних граждан, так и будущих, и уроки, извлеченные в прошлом, могут быть применены в будущем.

В долгосрочной перспективе разумно предположить, что кто-то где-то каким-то образом выйдет за допустимые пределы регулирования и контроля над вооружениями и использует возможности молекулярного производства для создания нового оружия. Если к тому времени у нас будет опыт нескольких десятилетий мирного, ответственного, творческого развития нанотехнологий (или, возможно, несколько лет помощи интеллектуальных машин), то мы, возможно, успеем разработать защитные средства для экосистем и сложные иммунные машины для медицины. Есть веские основания полагать, что распределенные технологии такого рода можно применить для решения проблемы защиты от нового наноружения. Неспособность сделать это может привести к катастрофе. Тем не менее, создание защитных систем такого рода будет самой большой проблемой из всех, что мы обсуждали. Главная цель тактики регулирования, которую мы описали, должна состоять в том, чтобы выиграть время для установления прочного мира, чтобы максимально увеличить шансы на то, что эта задача будет решена вовремя.

(Любой критик, объявляющий эту книгу оптимистичной, обвиняется в том, что не прочитал и не понял вышеприведенный абзац.)

Продолжать или остановить?

Потенциальные аварии в значительной степени заслуживают того внимания, которое им оказывают, и мы уверены, что этого внимания будет достаточно, чтобы нанотехнологии стали движущей силой повышения безопасности человека и защиты окружающей среды. Злоупотребление — большая опасность, и с

ним сложнее бороться. При рассмотрении предлагаемой политики, первый вопрос должен быть: «Как это повлияет на долгосрочную вероятность серьезных злоупотреблений?»

Управление, делающее сложный выбор

Управление технологиями — сложная задача. Это означает, что придется принимать множество решений относительно того, какие приложения полезны, а какие вредны в таких сложных областях, как медицина, экономика и окружающая среда. Это означает, что нужно будет постараться выбрать, какой из нескольких хороших подходов применить при очистке свалок токсичных отходов и каким способом обратить вспять парниковый эффект. И принимать более сложные решения при планировании восстановления экосистем и изменения окружающей среды.

Эти проблемы поставят нас перед выбором, который сегодня даже не стоит, и в то же время может привести к конфликту ценностей. Что лучше для конкретного участка земли — медленное восстановление дикой экосистемы или развитие в качестве парка отдыха? И то и другое намного лучше, чем тротуары, шахты и свалки, но выбор все равно вызовет споры.

Точно так же и в медицине у нас будет выбор: какие из множества различных способов лечения рака, болезней сердца и СПИДа следует разрабатывать. Но технологии, которые будут использованы для восстановления поврежденной сердечной мышцы, можно применить для восстановления структуры мышц и соединительной ткани в других частях тела, не опасаясь вредных побочных эффектов, вызываемых стероидными препаратами. Диапазон выбора, доступного для людей, будет огромным, и обязательно станет поводом для больших дебатов.

Когда сегодня обсуждают новую медицинскую технологию, часто говорят: «Эта процедура вызывает этические вопросы». Что обычно воспринимается, как сигнал отложить его использование, пренебрегая другим этическим вопросом: «Не является ли убийством отказ от этого спасительного лечения, пока мы размышляем о его допустимости?» Когда выбор затрагивает этические вопросы или вызывает конфликт моральных ценностей, наступает время принять этическое решение или отойти в сторону и позволить сделать выбор другим. Нежелание отвечать на этический вопрос, само по себе является ответом — и часто этически неоправданным. Новые технологии будут постоянно заставлять нас принимать неудобные решения, как и сама жизнь.

Создание правил для развития нанотехнологий будет сложной задачей: поиск путей обеспечения максимальной свободы исследованиям при одновременном предотвращении серьезных злоупотреблений и распространение этих правил на

весь мир является самой важной социальной задачей. Помимо этого, должны быть приняты решения, касающиеся правил его применения, и задачи обеспечения максимальной свободы выбора и предотвращения серьезных злоупотреблений, опять же во всем мире.

Управлять нанотехнологиями — значит принимать ряд решений, которые в конечном итоге могут изменить большую часть мира. К лучшему, если мы разумны, или к худшему, если будем действовать неумело и неосторожно. Избежать этой ответственности (если бы мы смогли) заманчиво, но, учитывая экологические и человеческие интересы, это, возможно, стало бы ошибкой исторических масштабов.

Пытаться остановить потерю контроля

Самое простое решение по «руководству» нанотехнологиями — это запретить их. Самый простой план — двигаться без понятной цели.

Это имело бы смысл обсуждать, если бы подобный подход был возможен. Однако надо помнить, что из-за своего огромного потенциала для злоупотреблений нанотехнологии могут нанести большой вред. Если мы считаем, что люди и человеческие институты слишком некомпетентны, чтобы иметь дело с нанотехнологиями — что они по природе своей склонны использовать ее для агрессии и использования в военных целях или готовы предоставить сумасшедшим свободный доступ к ним, — тогда вариант прекращения развития нанотехнологий может действительно показаться привлекательным. Но этический вопрос, который мы должны задать, вовсе не «станет ли лучше, если мы запретим нанотехнологии?», а другой: «готовы ли мы прекратить попытки делать вещи лучше»?

Одним из вариантов является продвижение вперед, подчеркивая необходимость соблюдать осторожность, а также потенциал для выгодных приложений. Обещание применения в медицине, экономике и для охраны окружающей среды в сочетании с угрозой, создаваемой новой гонкой вооружений, служит мощным мотивом для международного сотрудничества. С позитивными целями и открытой позицией международное сотрудничество является многообещающей стратегией; это может послужить основой для разработки и применения нанотехнологий.

С другой стороны, можно сосредоточиться на недостатках, постоянно указывать на возможные злоупотребления и участвовать в кампании по запрету нанотехнологий. Следуя этой стратегии, активисты должны преуменьшать гражданские применения нанотехнологий и подчеркивать военные. Ужасные истории о потенциальных злоупотреблениях (включая те, которые можно легко предотвратить) сделали бы технологию непонятной и опасной.

Такая стратегия может преуспеть в подавлении гражданских исследований во многих странах, хотя, вероятно, далеко не во всех. К сожалению, это также гарантировало бы финансирование военных исследовательских программ в секретных лабораториях по всему миру, даже в самых морально честных странах из-за неизбежного страха, что кто-то другой первым разработает нанотехнологию. В условиях враждебной общественной

атмосферы исследования будут проводиться в рамках секретных программ, что сделает невозможным широкое международное сотрудничество. Попытки остановить нанотехнологии из-за страха новой непредсказуемой гонки вооружений могут стать самоисполняющимся пророчеством. После этого сторонники запрета будут говорить: «Мы вас предупреждали!», а мир скатится к войне, которую они сами помогли подготовить.

Попытка остановить технологическое развитие — распространенная, но опасная идея. Чем больше у нее сторонников, тем больше разрыв между разработчиками технологии и их критиками. Даже небольшой успех приведет к тому, что исследования из государственных университетов будут переведены в корпоративные и военные исследовательские лаборатории. Большой успех заставит перевести исследования из корпоративных лабораторий в программы с высокой степенью секретности. Поистине удивительный успех положит конец большинству исследовательских программ. Останутся только военные программы, полностью контролируемые государствами с репрессивными правительствами или чуждыми идеологиями. По-видимому, это не то развитие нанотехнологий, которое мы бы выбрали.

Единственным подлинным успехом такой политики стал бы полный запрет исследований не только в Соединенных Штатах, Германии и Франции, а также в остальной части Западной Европы, в Японии, Советском Союзе, Китайской Народной Республике, на Тайване, в Корее, Южной Африке, Иране, Ираке, Израиле, Бразилии, Аргентине, Вьетнаме и части Колумбии, контролируемой Медельинским картелем. По мере совершенствования компьютеров и развития химии, когда все больше учеников старших классов смогут построить свои проксимальные зондовые микроскопы, для продолжения успешной политики потребуется запретить детям из пригородов Питтсбурга собираться в гаражах.

Конкуренция подталкивает технологии к тщательному контролю вещества, и мы видели, что эта цель может быть достигнута многими различными путями. Запрет одной области исследований не помешает продвигаться вперед и не остановит работу во всей стране. Когда Соединенные Штаты задерживают разработку лекарств из-за строгого регулирования со стороны FDA, фармацевтические компании просто переводят исследования за границу, или пропускают вперед зарубежные компании. Космические ракеты и ядерное оружие являются яркими тому примерами. Очень редко какая-то страна передает эти технологии другой, однако, по крайней мере, восемь стран

могут запускать спутники на орбиту самостоятельно и, по крайней мере, семь стран взорвали ядерные устройства, а еще две, как предполагается, очень близки к обладанию ядерного оружия. Индия и Израиль создали бомбы и запустили спутники, хотя ни одна из них не считается великой державой или ведущей силой в мире технологий.

Что касается нанотехнологий, многие страны способны проводить необходимые исследования, и в будущем их станет больше. Южная Корея имеет как необходимый уровень образования, так и амбиции; гости из КНР расспрашивают о нанотехнологиях. Решение на высшем уровне, направляющее ресурсы нации, может привести к результату практически где угодно. Соединенные Штаты постепенно расстаются с иллюзией, что они правят миром технологий. Эта иллюзия является плохой основой для принятия решений и действий.

Ответственное действие

Для достижения практических целей развитие нанотехнологий кажется неизбежным. Продолжая работу, можно добиться успеха, но только если мы будем проявлять простую осторожность, чтобы избежать несчастных случаев и чрезвычайное внимание для предотвращения злоупотреблений.

Трудно заставить людей серьезно относиться к не существующим технологиям. Современные проблемы интересуют людей больше, чем рассуждения о будущих возможностях. Из-за этого широкое международное регулирование нанотехнологий будет невозможно, пока они не заработают, и люди не начнут видеть ее результаты. После этого исследователям и правительствам необходимо будет сотрудничать и разговаривать с критиками технологий, чтобы регулирование было наиболее эффективным.

Каков же социально ответственный курс действий, подход, который, скорее всего, позволит избежать серьезного злоупотребления нанотехнологиями и приведет к реализации некоторых потенциальных выгод? Мы считаем, что необходимо указывать на потенциальные опасности и злоупотребления и способы их предотвращения, а также подчеркивать важность применения нанотехнологий в медицине, охране окружающей среды и экономике. Именно эти преимущества дают основание для поддержки открытых программ гражданского развития и международного сотрудничества, которое может служить основой для эффективного международного руководства.

Руководить нанотехнологиями будет не просто. Мы столкнемся с большим выбором, какого еще не было в истории. Только с помощью этого выбора мы сможем совершенствовать их.

Глава 13
Политика и перспективы

Исследовательские инженерные проекты показывают определенные технологические возможности, однако получение этих знаний может оказать парадоксальное влияние на наше понимание того, что такое вообще знания, и на представление о том, насколько хорошо мы понимаем будущее. Исследования дают нам больше информации, но при этом может раскрыться целый ряд возможностей, настолько широких, что мы почувствуем себя так, будто знаем теперь меньше, чем раньше.

К этому парадоксальному эффекту приводит перспектива появления нанотехнологий и молекулярного производства. Это делает некоторые сценарии развития — например, что мир середины двадцать первого века будет страдать от бедности или, что промышленность, выросшая из двадцатого века, окончательно погубит экологию, — на самом деле очень маловероятными. Это полезная информация, позволяющая понять нашу реальную ситуацию и составить разумные планы на будущее. И все же спектр открываемых новых возможностей шире, чем мы могли вообразить раньше. К отрицательным последствиям можно отнести создание машин уничтожения, способных разрушить мир так же основательно, как ядерная война. К положительным — ожидание наступления будущего стабильного мира с достигнутыми уровнями здоровья, благосостояния и качества окружающей среды, выходящими за рамки любого исторического прецедента и превосходящего нынешние ожидания.

В этом наборе возможностей (и за его пределами) есть место для будущего, которое мы даже не можем себе представить. Наши действия изо дня в день ведут нас к реализации одного из этих положительных вариантов. Не к какому-либо будущему наших нынешних планов, снов или кошмаров, а к реальному будущему, которое вырастет из предполагаемых и непреднамеренных последствий наших действий, в котором нам и нашим потомкам действительно придется жить.

Сценарии являются полезными инструментами для размышлений о будущем. Это не предсказания того, что произойдет, а всего лишь рассказ о некоторых мирах, у которых есть шанс реализоваться. Рассматривая эти сюжеты и сравнивая их, мы можем попытаться получить представление о том, какие события имеют больше шансов исполниться, а также понять, как выбор, который мы делаем сегодня, может повлиять на будущие

события.

Сценарий 0: Обычные ожидания (1990)

Нанотехнологии будут мало сказываться на жизни людей, пока они не разовьются достаточно хорошо, но произойдет это не скоро. Ожидание появления нанотехнологий, однако, будет влиять на то, как люди думают и действуют сегодня. Тем не менее, это ожидание будет не слишком сильным и, вероятно, в ближайшие годы подействует на мировые дела незначительно. В этом сценарии разумно начать со стандартного мировоззрения, по крайней мере, в течение следующих нескольких лет, а затем посмотреть, как позднее появление нанотехнологий и долгое ожидание их начнут взаимодействовать с крупномасштабными разработками.

Поскольку это пишется в те годы, когда старые представления о восточноевропейских, ближневосточных и мировых делах недавно оказались ошибочными, что там дальше будет происходить непонятно, прогнозы довольно неопределенны. Тем не менее, будем придерживаться общепринятого взгляда на ожидаемые события в ближайшие годы и десятилетия:

В следующие пять или даже пятьдесят лет технологии изменятся мало. Мощность компьютеров продолжит быстро расти, но не слишком быстрыми темпами. Большие технологические проблемы будут связаны с защитой окружающей средой: это решение проблем с парниковыми газами и кислотными дождями, а также с токсичными отходами.

Все больше стран одновременно достигнут высокого технологического уровня: смогут запускать спутники, создавать ядерное оружие и изготавливать компьютерные чипы. Благодаря всемирному обмену технической информацией и всеобщему стремлению к дальнейшему развитию технологий, все больше и больше стран второго ряда будут приближаться к уровню развития технологических лидеров.

Бытовая электроника продолжит совершенствоваться, но это приведет к тому, что население будет лучше развлекаться, в ущерб лучшей информированности. Захватывающие сообщения о высокотемпературных сверхпроводниках и низкотемпературном синтезе, будут продолжать появляться, но большинство людей будет игнорировать новости о предполагаемых открытиях, потому что после криков: «Волк!», они увидят только щенков и несбывшиеся сказки.

И через тридцать, и через пятьдесят лет большинство уважаемых аналитиков в газетных статьях будут утверждать, что

технологических изменений ждать не стоит. И через пятьдесят лет, прогнозируя поступления углекислого газа в атмосферу, будут предполагать, что большая часть энергии по-прежнему будет производиться из ископаемого топлива. А через тридцать лет будут делать прогнозы о наступлении экономического кризиса из-за старения населения и уменьшения притока новой рабочей силы, считая, что производительность труда не сильно изменится.

С точки зрения производительности труда и благосостояния населения Соединенные Штаты продолжат терять позиции относительно быстро развивающихся экономик Восточной Азии: Японии, Южной Кореи, Тайваня и Сингапура. С политической точки зрения сценарий «Обыкновенные ожидания» менее ясен, но ожидания, по-видимому, связаны с распадом Восточного блока и краха коммунизма как «прогрессивного» идеала, предполагая смещение к более свободному и более демократическому миру. В Восточной Европе и, возможно, в Центральной Азии появятся независимые страны, каждая из которых будет обладать своей промышленной базой и население, имеющее хорошее образование в области науки и техники.

Относительный упадок экономики США и Советского Союза в военном отношении ослабит некоторые из связей, которые сегодня соединяют мировые демократии друг с другом. Снижение угрозы советской военной мощи ослабляет альянсы. По мере ослабления НАТО и интеграции стран Европы в экономической и политической области разрыв между Соединенными Штатами и Европой увеличится. По мере ослабления советского давления на Японию ослабеет военный союз США и Японии, а торговые трения наоборот усилятся.

Естественно, что это усилит протекционистское давление. Вероятность экономического кризиса значительно вырастит. Переход от партнерских отношений к мирной враждебности станет зловещей реальностью. Рост множества практически равных центров экономического и технологического потенциала даст стимул для большей интеграции и сотрудничества, но, с другой стороны, приведет к росту конкуренции и секретности.

Однако в долгосрочной перспективе ограниченные ресурсы и затраты, как от растущего загрязнения, так и на меры по борьбе с загрязнением, приведут к остановке экономического роста во все более обедневшем мире. Рост населения замедлится, но продолжит оказывать огромное давление на экономику и экологию. Конфликты из-за ресурсов перерастут в войны. Климат необратимо изменится, старые леса почти исчезнут, что приведет к вымиранию большинства видов в дикой природе.

Небольшие изменения сценария «Обычные ожидания» в первые пять-десять лет могут обеспечить фон для сценариев, в которых появятся нанотехнологии, возможно, в следующие десять-двадцать лет:

Сценарий 1: Триумфальная Поллианна

Мы попадаем в мир, напоминающий сценарий «Обычные ожидания», где после нескольких лет, наконец, были разработаны примитивные, но достаточно умелые ассемблеры. Средства массовой информации, общественность и политики впервые серьезно отнеслись к перспективам нанотехнологий.

Для них все складывается очень хорошо. Ее применение показало, что однажды разработанную нанотехнологию можно контролировать и использовать, не загрязняя окружающую среду. Становится понятно, что она может в конечном итоге вытеснить загрязняющие отрасли промышленности, и в то же время значительно повысить уровень благосостояния населения. Ожидаемая польза для медицины огромна, и после многих лет растущего числа смертей от СПИДа — лишь частично остановленного достижениями в области молекулярной медицины — общественность стала очень чувствительной к регулярным сообщениям о заражении человека экзотическими вирусами приматов из Африки. Беспокойство по поводу стабильности климата и экосистем Земли возросло, поскольку леса сократились, а погодные условия изменились.

Перспектива попасть в этот сценарий привлекательна. Ясно, что нанотехнологии не представляют опасности, когда находятся в руках людей доброй воли, и относительно мирное десятилетие позволило многим людям забыть о существовании других мотивов.

Итак, пользуясь чудесной безраздельной общественной поддержкой, полученной от большой коалиции экологов, стремящихся заменить существующую промышленность, промышленников, стремящихся к более производительным технологиям, защитников здоровья, стремящихся к лучшей медицине, групп с низким доходом, стремящихся к большему достатку, и так далее, и так далее, компании и правительства безоговорочно погружаются в нанотехнологии обеими ногами.

Развитие идет стремительными темпами, и все, кто хочет участвовать в этом великом предприятии, получает такую возможность. Примитивные ассемблеры используются для создания лучших ассемблеров, которые используются для создания еще лучших ассемблеров, в лабораториях и хобби-магазинах по всему миру.

Продукции производится все больше. Экономика пребывает в смятении. И военной техники также производится все больше, начинает нарастать напряженность. Военная исследовательская

группа, обладающая скорее большим умом, чем разумом, строит репликатора монстров, которые съедают все, и мы все умираем.

Этот сценарий, по крайней мере, частично, абсурден, потому что необходимые предупреждения уже сделаны. С 1960-х годов некритические восторги по поводу новых технологий тиражировались только контролируемыми и ныне несуществующими печатными станками Восточной Европы (и аналогичных мест), и даже там возможность экологической катастрофы была предметом общественных дебатов, критики и исправления.

В расширяющемся сегодня свободном мире преимущества, издержки и опасности любой великой новой технологии будут тщательно изучены, разъяснены и обезврежены с разных сторон. В результате мы сможем или не сможем сделать правильный выбор. Но одно очевидно: сценарий Поллианны не победит, потому что факты не подтверждают его реальность.

Сценарий 2: Цыпленок правит петухом

Опять же, мы находимся в мире сценария «Обычные ожидания», когда только что были разработаны примитивные ассемблеры. На этот раз перспектива нанотехнологий впервые воспринимается всерьез, но она почему-то изображается просто как нечто подобное, существующим технологиям, но явно уступающее им. Экологи рассматривают его не как альтернативу загрязняющим отраслям промышленности двадцатого века, а как расширение человеческих возможностей и, следовательно, новые возможности человека причинять природе еще больший вред. Постоянно повторяются ужасные истории о технологиях, которые сошли с ума, чтобы поддержать эту точку зрения.

Группы контроля над вооружениями обоснованно встревожены нанотехнологиями и подчеркивают ее возможное военное применение. Они стремятся к разоружению — при этом верят в односторонние стратегии — и работают над тем, чтобы не допустить развития нанотехнологий везде, где они могут быть использованы для достижения политических целей, то есть везде. Чтобы усилить свое политическое влияние, они изображают их как почти чисто военные технологии, которые понадобились могущественной и зловредной власти.

Группы с особыми интересами в промышленности рассматривают молекулярное производство как угрозу для своего бизнеса и присоединяются к лоббистским усилиям по предотвращению его возникновения. Профсоюзы, пренебрегая перспективой роста благосостояния и досуга своих членов, вместо этого сосредотачивают внимание на возможных нарушениях трудовых соглашений. Они тоже выступают против разработки новых технологий. В результате мы слышим не о том, как нанотехнологии могут быть использованы в здравоохранении, для очистки окружающей среды и производстве улучшенных продуктов, а о коварной угрозе крошечных неконтролируемых военных машин-монстров, которые разрушат нашу промышленность.

Через несколько лет, сформированное таким способом, общественное мнение в индустриальных демократиях настроено решительно «против использования нанотехнологий», но это скорее лозунг, чем осуществимая политика. Тем не менее, принимаются законы для подавления его развития, и снова в центре общественного обсуждения старые темы нищеты и болезней и новые темы изменения климата и разрушения окружающей среды. Решения кажутся такими же далекими, как и

всегда. Ни один здравомыслящий человек не будет иметь ничего общего с нанотехнологиями, так что занимаются ими только неправильно думающие люди.

Однако пока не были разработаны первые ассемблеры, предварительные дебаты не привели к серьезным результатам, и исследования были продолжены, поскольку запретительный закон был принят с опозданием. К тому времени нанотехнологии уже были готовы к работе.

Развитие нанотехнологий — это, прежде всего, вопрос об инструментах, так же, как и при создании ядерного оружия. Десятилетиями ранее для создания ядерного оружия второй стране потребовалось сорок девять месяцев, а третьей еще пятнадцать лет, несмотря на потребность в большом количестве экзотических материалов для каждой бомбы. К 1980-м годам уже существовала огромная международная торговля химическими соединениями, и многие тысячи химиков знали, как их комбинировать, чтобы создать новые молекулярные объекты. Они работали не только в университетских исследовательских лабораториях или корпоративных исследовательских лабораториях, но и в гражданских и военных государственных исследовательских лабораториях. И, конечно, тайно, в криминальных исследовательских лабораториях, что подтверждает черный рынок синтетических наркотиков.

Еще в 1980-х годах сканирующий туннельный микроскоп был построен в качестве научного выставочного проекта для средней школы в Соединенных Штатах. В синтетической химии или в точном расположении молекул нет ничего сногсшибательного или экзотического. И в нашем сценарии примитивные ассемблеры уже разработаны, и методы их построения опубликованы (как стандартная практика) в открытой научной литературе.

Поэтому попытки запретить развитие нанотехнологий касаются только открытых проектов. Но правительства не могут быть уверены, что другие правительства не разрабатывают их в тайне, они так много слышали о военном потенциале нанотехнологий, что не могут это игнорировать. Во всем мире правительства тихо создают секретные исследовательские программы: одни в демократических государствах, другие в оставшихся авторитарных государствах.

А еще появляются подпольные лаборатории. Когда уже владеешь первобытным ассемблером или даже молекулярным манипулятором на основе АСМ, оставшиеся проблемы в основном связаны с рутинной работой. В 1980-х персональные компьютеры стали достаточно мощными, чтобы использовать их для конструирования молекул. В последующие годы мощь

компьютеров продолжала экспоненциально расти. Технокультура позволяет объединиться самым разным людям — выбирайте сами, это могут быть: радикальные анархисты, радикальные красные, радикальные зеленые или радикальные расисты. Действия каждой из этих групп направлены на разрушение «коррумпированного мирового порядка» правительств, компаний, религий, угнетения человеческих существ, цветных или небогатых. Объединившись с заслуживающими доверия группами, участвующими в гонке технологий, они увидят реальный шанс найти рычаги, необходимые для изменения мира.

Годы проходят в сравнительно спокойной обстановке, иногда возникают случайные слухи о тайной активности или разоблачении очередного проекта. И вдруг, неожиданно, из недоступного демократическому контролю места, на неподготовленный мир обрушиваются разрушительные перемены. Небо падает, и Маленький Цыпленок оправдан.

Если повезет, мы обнаружим, что и этот сценарий абсурден. Публичные дебаты в ближайшие годы, несомненно, представят более сбалансированную картину возможностей и опасностей, связанных с развитием нанотехнологий. Следует привлечь к обсуждению умных людей с противоположными взглядами. Невозможность попыток подавить технологии такого рода, вероятно, станет достаточно очевидной. Это позволит открыто и относительно ответственно развивать нанотехнологии.

Сценарий 3: Международная техноконкуренция

Разыгрывается вариант сценария «Обычные ожидания». И после нескольких лет продолжающейся неопределенности общий результат таков: экономическая мощь Японии выросла, и другие страны Восточной Азии начинают сокращать технологический разрыв. С конца 1980-х годов их крупные инвестиции в долгосрочные исследования и разработки молекулярных систем, ориентированных на гражданское применение, позволили им стать лидерами нарождающейся нанотехнологии.

Европейская экономическая интеграция и объединение Германии в сочетании с давлением экономической и технологической конкуренции со стороны Соединенных Штатов и Японии в некоторой степени заставят Европу закрыться. Хотя культурные связи позволяют поддерживать в основном теплые отношения между США и Европой, враждебность между Европой и Японией, уже отмеченная в 1980-х годах, возрастет. Европа долгое время обладала огромным превосходством в области химии и фундаментальной науки, и в 1980-х годах превосходила Соединенные Штаты в организации работ в области молекулярной электроники. Это позволило им занять прочные позиции в области нанотехнологий, уступив Японии, но опередив Соединенные Штаты.

Соединенные Штаты остаются чрезвычайно продуктивной экономикой, но кумулятивный эффект от соединения пренебрегающей обучением образовательной системы, и деятельности корпораций, озабоченных исключительно квартальными отчетами, дали о себе знать. После десятилетий исключительного внимания к краткосрочной перспективе люди вдруг оказались в мире, где важны долгосрочные планы, которыми они пренебрегли. Реакцией на относительный экономический спад в США станут не инвестиции и обновление, а риторика и враждебность в отношении «иностранцев», особенно японцев.

Таким образом, именно изолированная и, как казалось, отстающая Япония строит первый молекулярный манипулятор и осознает его долгосрочный потенциал. Технология разработана в финансируемой правительством исследовательской лаборатории в сотрудничестве с крупными японскими корпорациями. В результате обострения напряженности иностранные исследователи — те, кто в это время находился в Японии — не

были приглашены для участия в этом проекте.

Серия заседаний комитетов подтверждает негласное решение, принятое ранее при подборе исследователей. Отныне особенности новой разработки считаются частной собственностью. Объявляется о вызывающих гордость японских исследованиях и полученных впечатляющих результатах, но особенности применяемых методов хранятся в тайне.

Но это едва ли задерживает распространение базовой технологии. После первой демонстрации даже самые близорукие инвестиционные агентства поддерживают аналогичные исследования. Европейский проект уже был запущен во французской лаборатории: вскоре им удалось построить ассемблер, работающий на несколько иных принципах. Европейские исследователи, подобно японцам, сохраняют детали своих методов в секрете во имя конкурентоспособности Европы. Год спустя Соединенные Штаты запускают собственный проект, финансируемый министерством обороны.

Общественная жизнь, между тем, продолжается. Наибольший интерес вызывают выходки артистов и политиков, а также сетования о судьбе окружающей среды или системы социального обеспечения в фантастическом будущем экстраполированных технологий двадцатого века. Но все чаще и чаще в политических кругах и в средствах массовой информации появляются серьезные обсуждения нанотехнологий и молекулярного производства — что они значат и что с ними делать.

В Японии ассемблеры второго поколения начали выпускать небольшие количества все более сложных молекулярных устройств. Это прототипы коммерчески полезной продукции: датчики, молекулярные электронные устройства и научные приборы; некоторые выгодно использовать даже по цене в сто долларов за молекулу. Существуют уже конструкторские разработки молекулярных ассемблеров, которые можно производить по цене менее одной триллионной доллара. Появились долгосрочные планы (рассматриваемые с надеждой и ожиданием) для полноценного молекулярного производства, способного сделать практически все по низкой цене из обычных материалов.

Это впечатляет. Это обещает, наконец, освободить Японию от ее многовековой зависимости от внешней торговли, иностранных продуктов питания, иностранного сырья и внешней политики. Делая космический полет недорогим и рутинным, нанотехнология обещает открыть вселенную людям, запертым на переполненной планете. Инвестиции взлетают.

Европа опережает Америку, но отстает от Японии и смотрит

на прогресс Японии с враждебностью. Европейцы тоже разделяют мечты о мощных технологиях и начинают борьбу за лидерство. Соединенные Штаты отстают, но когда они присоединяются к гонке, их огромные ресурсы и опыт в области программного обеспечения помогают им набрать скорость. И другие страны не остаются в стороне, и, хотя они неуклонно продвигаются вперед, идти в ногу с блоком великих держав не могут.

Очевидная возможность использования потенциала молекулярного производства в военной области вызывает острый интерес у всех участников гонки, и, естественно, поощряет исследования и разработки, как в публичных, так и в секретных программах. Стратеги играют в нанотехнологические военные игры в своих умах, в своих журналах и на своих компьютерах. Открывающиеся возможности потрясают их. Чем больше они думают об этом, тем больше находят стратегий, которые позволят технологически превосходящей силе сделать безопасный, упреждающий ход — смертельный или нелетальный — против всех своих противников. Защита кажется, в принципе, достижимой, но не сейчас.

Становится очевидным, что защиту от прежних технологий может обеспечить только молекулярное производство. Даже великий, мифический оборонный противоракетный щит выглядит реальным, если он использует технологии, значительно превосходящие предыдущие, и многотысячное преимущество в стоимости строительства военной техники.

Даже самая грозная сила не кажется больше особенно враждебной. Все уже давно, формально или неформально, много лет поддерживают мирное сосуществование. Но воспоминания о войне все еще сильны, а возможности союза и военного сотрудничества ослаблены отсутствием общего врага и ростом экономического соперничества. И поэтому ссоры из-за торговли устаревшими технологиями двадцатого века отравляют сотрудничество в разработке и управлении новыми технологиями двадцать первого века.

Существует тысяча причин для проведения военных исследований и разработок с новыми технологиями, и экономическая конкуренция между странами помогает сохранить эту работу в секрете на государственном уровне. Военные планы строятся не на намерениях, а на возможностях.

Таким образом, технологии, разработанные в атмосфере коммерческого соперничества и секретности, созревают в атмосфере военного соперничества и секретности. Передовые нанотехнологии появляются в мире не как успехи в медицине, восстановлении окружающей среды или основы для роста

благосостояния, а как военные системы, развивающиеся в разгар ускоряющейся многосторонней гонки вооружений, с негласной целью упреждающего использования. Переговоры и развитие продолжаются, а в это время…

Сценарий 4: Достаточная согласованность

И снова наш мир — это вариант сценария «Обычные ожидания», но международная обстановка находится в более здоровом состоянии. Несмотря на торговые трения, глобальная экономическая интеграция продолжается. Европа, Соединенные Штаты и Япония — все заинтересованы в благополучии друг друга, и признают это. Международное военное сотрудничество продолжается, отчасти как сознательный противовес торговым конфликтам. Международное сотрудничество в области исследований расширилось, во многом благодаря стремлению Японии к более тесным международным связям. Конец холодной войны сделал секретные программы военных исследований менее распространенными.

Именно в этой среде разрабатываются примитивные ассемблеры, и неважно, кто первым это сделает. Как принято в фундаментальных исследованиях, группы публикуют свои результаты в открытой литературе и соревнуются, чтобы удивить своих коллег внутри страны и за рубежом блеском своих достижений.

Появление первых ассемблеров вызывает серьезные дебаты о нанотехнологиях и их последствиях, и эти дебаты достаточно открыты и сбалансированы. Они охватывает военные, медицинские и экологические последствия, уделяя особое внимание тому, как чистое и эффективное производство может повысить уровень благосостояния и распространить его по всему миру.

Военные аналитики считают влияние молекулярного производства и его потенциальных продуктов серьезным, поэтому они проводят секретные исследовательские программы. Но, как обычно, секретность замедляет общение между исследователями: те, кто участвует в секретных программах, отстают от своих более открытых коллег, чей неформальный обмен информацией намного опережает публикации в журналах.

Некоторые силы стремятся к соперничеству; а кто-то к сотрудничеству. Возникает здоровая картина: решения принимают те, кто относится к нанотехнологиям наиболее серьезно, те, кто видит в их развитии возможность снизить причины для возникновения в будущем международных конфликтов между демократическими странами. Они больше не ожидают возникновения вражды из-за истощающихся ресурсов, имущественного неравенства и глобального загрязнения атмосферы. Они видят, что нанотехнологии могут сделать для

решения этих проблем, ни у кого больше ничего не требуя. И поэтому, с любой точки зрения, те, кто относится к нанотехнологиям серьезно, оказываются наиболее склонными к поиску совместных решений проблем, которые она создает. Есть исключения, но поток мнений против нанотехнологий мало влияет на политику.

Общественные дебаты по нанотехнологиям растут, и они широко распространены. Энтузиасты предлагают множество чудесных приложений для нанотехнологий. Некоторые, правда, вскоре отклоняются как невозможные или просто нежелательные. Некоторые из них — реальные улучшения ужасных технологий двадцатого века; они разрабатываются и применяются почти сразу, как только это становится технически возможным. Остальные сложнее оценить, но в течение многих лет напряженной работы и тщательного изучения некоторые из них были разработаны и приняты, а другие отклонены.

Сначала некоторые люди стремились запретить нанотехнологии, но они никогда не предлагали надежный способ, как это сделать. Реалисты, наблюдающие за всемирным технологическим брожением, ищут другие варианты борьбы с опасностями.

Индустриальные демократии мира, объединившись, сохраняют решающее лидерство. Они разработали механизмы для координации развития технологий и контроля за военным потенциалом путем регулирования передачи информации или торговли ими. Эти механизмы были разработаны, отработаны и отточены на протяжении десятилетий опыта холодной войны не только с ядерными и ракетными технологиями, но и с множеством высокотехнологичных продуктов и устройств. Эти механизмы не идеальны, но они полезны.

В связи с ростом международной нестабильности индустриальные демократии стремятся улучшить свою совместную позицию: они укрепляют традиции свободной торговли и сотрудничества между собой и усиливают правила, которые блокируют поток критически важных технологий оставшимся в мире диктаторам.

В результате нанотехнологии развиваются в атмосфере экономического сотрудничества, а не военной конкуренции. Основное внимание в политике уделяется гражданским применениям с должным вниманием к потенциальным военным угрозам. Доверие подкрепляется автоматической «взаимной проверкой», которая является естественной частью совместных исследований и разработок.

Жесткие решения остаются, и крики и аргументы становятся

все громче во всех мировых СМИ. Но там, где проблема ясна и на карту поставлены выживание или мировое благополучие, принимаются необходимые решения, и для их реализации достаточно международного согласия.

Проходят годы и технологии совершенствуются. Здоровье улучшается, благосостояние растет, и биосфера начинает заживлять раны. Несмотря на сомнения и муки перемен — и несмотря на голоса, говорящие: «В старые времена было лучше», по крайней мере, для них. И, несмотря на реальные потери, многие люди доброй воли смотрят на мир, оценивают ситуацию и утверждают, что изменения, в целом, привели к лучшему.

Перспективы

Современных знаний о молекулах и веществе достаточно, чтобы приблизительно представить, на что молекулярные машины и молекулярное производство будут способны в будущем. Даже эта обрывочная картина показывает возможности, которые делают старые представления о двадцать первом веке полностью устаревшими.

Наука и техника продвигаются к молекулярному производству по многим направлениям: в химии, физике, биологии и информатике. Мотивы продолжения его разработки варьируются от медицинского и военного до научного. Исследования в этих направлениях уже ведутся по всему миру, и они только начинают фокусироваться на нанотехнологиях.

Уже сейчас легко описать, как известные устройства и принципы могут быть объединены для создания примитивного устройства, способного управлять молекулярной сборкой. На самом деле сделать это будет не так просто — лабораторных исследований никогда не будет — но это будет сделано, и произойдет это довольно быстро.

Первые, медленные ассемблеры позволят создать лучшие ассемблеры. Машины, способные соединять молекулы для создания молекулярных машин, обязательно приведут к снижению затрат и повышению качества, что, в конечном итоге, приведет к многим результатам, которых так страстно желают люди: это и более чистая окружающая среда, и спасение от бедности, и лечение, которое исцеляет. Эти преимущества принесут волнительные изменения и поставят перед тревожным выбором, как всегда это происходит, когда появляются новые возможности. Темпы перемен вполне могут ускориться, заставляя институты, которые мы развивали, справляться с бурными временами.

Можно злоупотребить возможностями производства молекулярной продукции, в частности, те, кто стремится к власти, могут использовать его для создания оружия. Чтобы минимизировать риск таких злоупотреблений, нам необходимо развивать широкое международное сотрудничество и регулирование. Внутри страны это кажется лучшим способом избежать конфликта между теми, кто занимается решением старых проблем, и теми, кто стремится справиться с новыми. На международном уровне это лучший способ не допустить отвратительного сползания в новую гонку вооружений.

Как видно из четырех только что описанных сценариев,

общественное мнение будет формировать государственную политику, помогая определить, используются ли эти технологии во благо или во вред. В послесловии мы рассмотрит современную ситуацию и то, что можно сделать, чтобы продвинуться в позитивном направлении.

Мы не стремимся предсказать будущее и не можем точно описать последствия наших действий. Тем не менее, то, что мы делаем, будет иметь значение, и мы можем начать с попытки избежать многих грубых промахов, которые обязательно выявятся. Помимо этого, мы можем попытаться понять ситуацию, в которой находимся, взвесить наши основные ценности и выбрать наши действия с максимальной мудростью, которую мы сможем продемонстрировать. Выбор, который мы сделаем в предстоящие годы, сформирует будущее, которое выходит за рамки нашего воображения, будущее, полное опасности, но полное надежд. Так было всегда.

Послесловие

Человеческая раса приближается к великому историческому рывку, обеспечивающему тщательный и недорогой контроль над структурой вещества со всеми вытекающими отсюда последствиями для медицины, окружающей среды и нашего образа жизни. То, что будет происходить до и во время этого перехода, определит его направление, а вместе с ним и будущее.

Стоит ли волноваться? Посмотрите на некоторые проблемы, которые объединят людей для их решения:

бедность
вымирающие виды
системы оружия
свобода
вырубка леса
работа
токсичные отходы
атомная энергия
социальная защита
продление жизни
жилье
освоение космоса
глобальное потепление
кислотный дождь

СПИД, болезнь Альцгеймера, порок сердца, болезнь легких, рак…

Решение каждой из этих проблем требует больших усилий. Каждая из них будет полностью изменена нанотехнологиями и их приложениями. Для многих из этих проблем нанотехнологии предлагают инструменты, которые можно использовать для достижения того, к чему стремятся люди. И при решении всех их злоупотребление нанотехнологиями может уничтожить все то, что было достигнуто.

Хорошей парой для принципа «думай глобально, действуй локально» является «думай о будущем, действуй в настоящем». Если бы все отказались от решения краткосрочных и насущных сегодня проблем, результаты были бы катастрофическими. Но такой опасности нет. Более вероятна противоположная опасность. Мир движется прямо к разрушительному переходу, когда все будет поставлено на карту, однако 99,9 процента человеческих усилий и внимания идут на краткосрочные проблемы или на долгосрочные стратегии, основанные на представлении о фантастическом будущем неуклюжих технологий двадцатого

века.

Что же делать? Для людей, которые больше заботятся о том, чтобы чувствовать себя лучше, чем о том, чтобы делать добро, ответ прост: стремитесь к приятным ощущениям, возникающим в результате добавления еще одного усовершенствования к чему-то уже известному. Вы почувствуете удовлетворение немедленно, даже если ваш вклад будет невелик. Для людей, более заинтересованных в том, чтобы делать добро, которые могут чувствовать себя хорошо, только если они реализуют свой потенциал, ответ менее прост: чтобы сделать что-то по-настоящему хорошее, найдите важный проект, который еще не поддержан подавляющим большинством, где вклад каждого человека почти автоматически имеет большое значение.

Сегодня существует очевидный выбор, где искать такой проект. Потенциальные преимущества и недостатки нанотехнологий создают тысячи областей для развития, исследований, образования, лоббирования, дискуссий, предпринимательства, регулирования и всего остального — для подготовки и действия. Вклад человека может варьироваться от занятия собственной карьерой до устной поддержки. И то, и другое может изменить мир.

Мнение имеет значение

То, что люди делают, зависит от того, во что они верят. Путь в мир, подготовленный для работы с нанотехнологиями, начинается с осознания того, что нанотехнологии — это реальная перспектива.

Каков был бы ответ на новую идею, столь же обширную как нанотехнология, если бы она была верной? Поскольку это не относится к какой-либо существующей технической специальности, никто не станет давать официальную, авторитетную оценку. Современное молекулярное производство не может быть разработано сегодня в лаборатории, поэтому для ученых, играющим в стандартную игру и стремящимся сделать карьеру и получить финансирование, она не будет иметь значения. Тем не менее, некоторые ученые и инженеры могут заинтересоваться, задуматься и оказать поддержку. «Science News», освещая первую крупную конференцию на эту тему, объявили, что «рано или поздно наступит век нанотехнологий». Это, собственно, и произошло.

Но что, если идея была ложной? Какой-нибудь любопытный ученый или инженер обязательно укажет на фундаментальную ошибку в идее. Поскольку широкие последствия нанотехнологий делают многих людей ненужными, хороший контраргумент быстро распространится и скоро будет на устах каждого, кто предпочел бы отмахнуться от этой работы.

Такого контраргумента пока нет. Наиболее вероятная причина этого заключается в том, что нанотехнологии являются разумной идеей. Реакции меняются с «это смешно» на «это очевидно». Общее признание проблемы почти достигнуто.

Мы должны быть готовы к тому, что нанотехнологии перейдут из мира идей в мир физической реальности. Но что для этого требуется? Чтобы понять, что нужно сделать сегодня, лучше всего начать с долгосрочной перспективы, а затем вернуться к настоящему.

Где мы должны быть

Когда мир окажется в процессе перехода к молекулярному производству, а случится это уже через несколько лет, было бы лучше, если бы люди были готовы к этому, и ситуация в мире благоприятствовала совместным мирным усилиям. Сбалансированный международный прогресс лучше, чем доминирование любой нации. Совместное развитие лучше, чем технологическое соперничество. Сосредоточение на гражданских целях лучше, чем на военных. Хорошо информированная общественность, поддерживающая разумную политику, лучше, чем ошеломленная публика, поддерживающая непродуманные схемы.

Все эти цели будут легче достигнуты, если политики не будут вынуждены вести себя как идиоты, то есть, если состояние общественного мнения позволит им принимать правильные решения и, возможно, если принимать плохие политические решения будет им невыгодно. Основная цель проста: построить мир, в котором как можно больше людей будут иметь общее представление о том, что происходит, осознают, как это может привести к лучшему будущему, и, как следует, поймут, что делать (а что не делать), чтобы достичь этого будущего. Контуры позитивного сценария будут выглядеть примерно так.

Экологические группы и агентства продумают проблемы, поднятые нанотехнологиями, и решат, какие исследования они хотят продвигать и какие злоупотребления хотят предотвратить. Аналогичным образом, медицинские ассоциации, объединения пенсионеров и служба социального обеспечения обсудят вопросы, связанные с резким улучшением медицинского обслуживания и ростом производительности труда, и будут готовы дать рекомендации по вопросам политики. Бизнес-группы так же поступят с экономическими вопросами, а закрытые деловые группы готовы будут раскрыть свою политику, которая служит их особым интересам. Лейбористские группы рассмотрят влияние глубокой глобальной экономической реструктуризации рабочих мест на доходы своих членов и выдвинут предложения по смягчению потрясений без снижения производительности. Религиозные лидеры рассмотрят моральные аспекты многих приложений и подготовят свои советы. Военные аналитики и аналитики по контролю над вооружениями проделают кропотливую работу по продумыванию стратегических сценариев и разработают согласованную политику поддержания стабильности. Международные комитеты и агентства сделают

новые технологии объектом обсуждения и планирования и, опираясь на здоровый климат, они заставят международное сотрудничество работать.

В целом, при поддержке системы разумного общественного мнения и разумной политики, сложный процесс адаптации к изменениям заработает довольно хорошо. Шаг за шагом, группа за группой выполнят тяжелую работу, необходимую для разработки политики, которая бы продвигала их реальные интересы, не затрагивая чужие. Возможно, это получится быстрее, чем многие ожидают, потому что молекулярное производство многое делает лучше. Впереди еще будут большие сражения, но появится и большая основа для согласия.

В это переходное время некоторые люди будут активно участвовать в разработке и управлении технологиями, но большинство людей останутся обычными гражданами: потребителями, рабочими, друзьями и членами семьи. Они будут оказывать влияние на то, что происходит в более широком мире, с помощью своих голосов, взносов и покупок. Обстановка в их семьях и общинах будет сформирована тем, что они говорят, что они делают, и особенно инвестициями в образование, которые они сделали или поддержали. Своим выбором они определят, что нанотехнологии означают для повседневной жизни.

Как мы можем туда добраться

Такой мир потребует многих лет подготовки. Что люди могут сделать в ближайшие годы, чтобы помочь появлению такого рода мира, чтобы облегчить перспективы мирного и выгодного перехода к новым технологиям? В настоящее время основной задачей является распространение информации.

Люди, работающие в существующих организациях, могут подтолкнуть других к оценке нанотехнологий и молекулярного производства. Хорошее начало — познакомить других сотрудников своей организации с концепциями и обсудить некоторые их последствия. Последующие действия будут зависеть от группы, ее ресурсов и целей.

В настоящее время разработка новых правил, лоббирование в Конгрессе и тому подобная работа кажутся преждевременными. Однако включение нанотехнологий в процесс планирования представляется запоздалым. Мы приглашаем существующие организации, озабоченные медициной, экономикой, окружающей средой и другими вопросами государственной политики, включить нанотехнологии в свои повестки дня и участвовать в обсуждении и, в конечном итоге, реализации разумной политики.

Некоторые группы проводят соответствующую исследовательскую работу. Многие могут сместить свой выбор проектов в область молекулярной инженерии. Чтобы нанотехнологии воспринимались действительно серьезно, какой-нибудь исследовательской группе придется построить достаточно умелый молекулярный манипулятор или примитивный ассемблер. Для этого потребуется междисциплинарная команда, годы работы и финансирование, которое вряд ли превысит одну десятую часть стоимости одного полета космического корабля США.

Другие исследователи могут помочь, продолжив теоретические исследования возможностей передового молекулярного производства и нанотехнологии. Эти исследования могут помочь группам понять, что следует учитывать при планировании.

Некоторые ученые и инженеры захотят связать свою карьеру с нанотехнологий. Еще больше студентов захотят изучить сочетание физики, химии и техники, которые подготовят их к участию в будущей работе.

Мы призываем людей здравого смысла и доброй воли участвовать в развитии нанотехнологий. Для тех, кто имеет или может получить необходимые технические знания, участие в его

разработке является отличным способом повлиять на то, как они будут использоваться. Хорошо это или плохо, но технические эксперты в данной области имеют несоразмерное влияние на политиков.

В эти годы возрастет потребность в низовых организациях, направленных на общественное просвещение и создание базы для политических действий. Наличие нескольких тысяч человек, готовых написать пять писем в Конгресс в решающий момент, может разделить мир, на работающий и разрушенный долгосрочными последствиями близорукого законопроекта.

Что произойдет, будет зависеть от поступков людей, а то, что люди будут делать, зависет от того, во что они верят. Мир в подавляющем большинстве определяется состоянием общественного мнения: важны представления людей о том, что произойдет, а что нет, что будет работать, а что нет, что выгодно, а что не выгодно для их семей, для их бизнеса, для их сообществ, для мира. Такое мнение — выраженное в том, что люди говорят друг другу, и соответствуют ли их действия их словам — ежедневно формирует принимаемые решения. Все это время будет иметь большое значение, что люди говорят друг другу о будущем и как пытаются заставить его работать.

Начинаем

С помощью новых технологий мы можем изменить мир — не делать его идеальным, не устранять конфликты, не реализовывать все мыслимые мечты, но при этом избавиться от многих неприятных проблем, как старых, так и современных. При хорошей подготовке мы, возможно, даже сможем избежать создания слишком большого количества новых проблем.

Кто несет ответственность за попытки добиться этого? Те, кто хочет бороться с бедностью, получить свою долю будущих выгод, поучаствовать в великом приключении, встретиться с людьми, которые заботятся о будущем, спасти виды, исцелить Землю, вылечить больных, быть первым, наладить международное сотрудничество, узнать о новых технологиях, бороться с опасностями, изменить мир — не обязательно все вместе или все сразу.

Чтобы помочь справиться с главной проблемой сегодняшнего дня, недостатком знаний, вы можете побудить друзей почитать литературу на эту тему. Если вам понравилась эта книга, пожалуйста, предложите ее.

Институт Форсайта публикует информацию и организует конференции, посвященные нанотехнологиям и их последствиям. Он предоставляет канал для распространения новостей, технической информации и обсуждения государственной политики, а также может помочь вам связаться с активными людьми и организациями. Чтобы оставаться в курсе событий, которые будут определять наше будущее, пишите или звоните:

Институт Форсайта
PO Box 61058
Palo Alto, CA 94306
Voice: 415-917-1122
Fax: 415-917-1123
electronic mail: foresight@foresight.org.

Дополнительное чтение

Здесь перечислены дополнительные источники нетехнической информации о нанотехнологиях и смежных темах. (Для более технического материала, см. Техническую библиографию.)

Институт Форсайта

Эта некоммерческая организация была основана для рассмотрения возможностей и решения проблем, связанных с нанотехнологиями и другими ожидаемыми мощными технологиями. Доступные материалы включают в себя информационный бюллетень «Обновление», серию «Фоновая ориентация», отдельные статьи и сборники конференций. Студенты и другие люди, планирующие заниматься исследованиями, связанными с нанотехнологиями, могут запросить «Брифинг № 1: Изучение нанотехнологий». Институт Форсайта спонсирует конференции по техническим и политическим вопросам, связанным с нанотехнологиями. Читатели, обеспокоенные исчезающими видами, должны узнать о проекте BioArchive. Адрес института указывается в конце послесловия.

Институт Форсайта: http://www.foresight.org/

Книга К. Эрик Дрекслера «Двигатели творчества: грядущая эра нанотехнологий»

Эта первая книга по нанотехнологии (Doubleday 1986) исследует тему с более абстрактной и долгосрочной точки зрения. В числе рассматриваемых тем — связь нанотехнологий с научными знаниями, эволюция идей, искусственный интеллект, продолжительность жизни человека, пределы роста, оздоровление окружающей среды, предотвращение технологического злоупотребления, космическое развитие, а также необходимость новых социальных технологий — таких как гипертекстовое издание и форумы, где бы обсуждались конкретные факты — чтобы помочь нам справиться с быстрыми технологическими изменениями.

Издана в Британии в «Fourth Estate» и в Японии в «Personal Media» (под названием «Машины, которые создают:

нанотехнологии»).

Сейчас книга доступна в Интернете

Другие книги и очерки

Аткинс, П.В. «Молекулы». (Научно-американская библиотека, серия № 21, 1987). Изящно написанное и хорошо иллюстрированное введение в молекулярный мир, показывающее повседневное использование множества молекул.

Беннетт, Джеймс С. «Создание конкурентной космической торговли: общий рынок для космического предпринимательства». Санта-Моника, Калифорния: исследование политики Фонда Reason No. 123 (август 1990 г.), предложило основу для международного технологического регулирования, которая может быть распространена на нанотехнологии.

Бренд, Стюарт. «Медиалаборатория: Изобретая будущее в Массачусетском технологическом институте». Нью-Йорк: Викинг, 1987. Ярко описывает работу лаборатории над персональными информационными технологиями, которые мы будем использовать завтра.

Берджесс, Джереми. «Микрокосмос». Нью-Йорк: издательство Кембриджского университета, 1987 год. Коллекция красивых изображений микромасштабного мира.

Бернхэм, Джон С. «Как суеверия победили науку». Нью-Брансуик, Нью-Джерси: Ратгерс, 1987 год. Рассказывает историю снижения усилий ученых по установлению контактов с общественностью, и, как следствие, размывания общественного понимания (что в конечном итоге приводит к ошибочной государственной политике).

Дрекслер, К. Эрик. «Изучение технологий будущего» в «Как делается наука: Клуб реальности», изд. Джон Брокман Нью-Йорк: Prentice Hall, 1991. Эссе, описывающее исследовательский инженерный подход к пониманию будущих технологических возможностей.

Дрекслер, К. Эрик. «Технологии опасности и мудрости» («Technologies of Danger and Width»), в «Направлениях и последствиях передовых вычислений», том 1 eds. Джонатан Джеки и Дуглас Шульер, эд. Norwood, Нью-Йорк: Ablex, 1989. В этом эссе обсуждается, как компьютерные технологии можно было бы использовать для укрепления социальных механизмов и для решения сложных проблем. В основу тома положена первая крупная конференция «Компьютерные профессионалы за социальную ответственность».

Милбрат, Лестер. «Создание устойчивого общества». Олбани, Нью-Йорк, 1989 год. Обширная работа, включающая краткое обсуждение потенциальных последствий нанотехнологий.

Вильдавский, Аарон. «Поиск безопасности». Нью-Брансуик, HJ: Университет Боулинг Грин, 1988. Эта книга документирует, как использование новых технологий может — и делает — снижать старые риски быстрее, чем создает новые, и как недостаток или избыток осторожности может снизить безопасность.

Статьи и журналы

«Научная энциклопедия Британника» и «Ежегодник будущего» 1990. Этот ежегодный доклад включает восемнадцатистраничное введение в нанотехнологию.

«Восстановление компьютеров». Научный американец, январь 1988. Колонка, описывающая молекулярно-механические компьютеры.

«Невидимая фабрика». The Economist, 9 декабря 1989 года. Краткое, четкое и технически точное введение в нанотехнологию.

«Где будут созданы следующие состояния». Форсаж, 5 декабря 1988 г. Включает обсуждение бизнес-последствий нанотехнологий.

С информацией и публикациями о биостазисе и будущих медицинских возможностях можно ознакомиться в Фонде продления жизни Алькора, 12327 Доэрти-стрит, Риверсайд, CA 92503; Телефон (714) 736-1703.[4]

Science News — еженедельный newsmagazine, доступный нетехническому читателю. Хороший путеводитель по (в том числе) последним разработкам на пути к нанотехнологиям.

Техническая библиография

Здесь невозможно дать полную библиографию публикаций, связанных с нанотехнологиями. Следующие книги, доклады и статьи позволят читателям ознакомиться с некоторыми соответствующими литературами. Более полный список доступен в Институте Форсайта.

Документы и статьи

ДеГрадо, Уильям Ф., Зельда Р. Вассерман и Джеймс Д. Лир, «Конструкция белка, минималистический подход». Наука 243 (1989) 622-28. Описывает успешную работу в конструировании белков.

Дрекслер, К. Эрик. «Молекулярная инженерия: подход к разработке общих возможностей для молекулярных манипуляций». Разбирательства Национальной академии наук (США) 78 (1981) 5275-78. Первое описание гибкого молекулярного производства на основе искусственного молекулярного оборудования.

Дрекслер, К. Эрик и Джон С. Фостер. «Синтетические советы». Природа 343 (1990) 600. Предлагает подход к построению молекулярного манипулятора.

Дрекслер, К. Эрик. «Массивы молекулярных наконечников» (AFM Imaging and Nanofabanning). Журнал вакуумной науки и техники Б. Апрель 1991 (в печати). Альтернативный подход к целям, описанным в разделе «Синтетические советы», направлен на устранение некоторых технических проблем и повышение производительности и гибкости.

Фейнман, Ричард. «Там много места на дне», речь опубликована в более коротком виде как «Чудеса, которые обнаружит микроскоп». Субботний обзор 43 (2 апреля 1960) 45–47; Воспроизводится более подробно под первоначальным названием в документе «Миниатюризация». Гилберт Нью-Йорк: Рейнхольд, 1961. Провидческий разговор рисует миниатюризацию сверху вниз на микросекуле, и явно указывает на направление нанотехнологии.

Фостер, Дж. С., Дж. Э. Фроммер и П. С. Арнетт. «Молекулярная манипуляция с использованием туннельного микроскопа», Nature 331 (1988) 324-26. Описывает первое использование STM для ограничения молекул крупным объектом.

Хаузе, Уильям Д. и др., «Генерация большой комбинаторной

библиотеки репертуара иммуноглобулина в Phage Lambda». Наука 246 (1989) 1275-81. Описан способ получения белковых молекул, которые связывают другие специфические белки путем отбора из большого числа фрагментов антител, без использования клеток млекопитающих.

Лен, Жан-Мари. «Супрамолекулярная химия — Объем и перспективы: Молекулы, Супермолекулярные и молекулярные устройства». Международное издание Angewandte Chemie на английском языке 27 (1988) 89-112. Описывает работу в области молекулярного распознавания (Нобелевская лекция Лэна).

Пондер, Джей У. и Фредерик М. Ричардс. «Третичные шаблоны для белков». Журнал молекулярной биологии 193 (1987) 775-91. Описывает компьютерные методы выбора аминокислотных последовательностей, совместимых с данной сложенной структурой.

Книги

Альбертс, Брюс и др. «Молекулярная биология клетки», 1989.

Описывает естественную молекулярную технику.

Буркерт, Ульрих и Норма Л. Аллингер. «Молекулярная механика», 1982.

Классический текст о моделировании молекул в механическом отношении, основанный на соотношениях между энергией и молекулярной геометрией.

Кларк, Тим. «Руководство по вычислительной химии», 1985.

Описывает использование компьютерных классических и (особенно квантовых механических моделей молекул.

Крэндалл, Б. С. и Джеймс Льюис, Эд. «Материалы первой Конференции по нанотехнологиям», 1991.

Крейтон, Томас Е. «Белки», 1984.

Отличное введение белков в качестве физических объектов.

Дрекслер, К. Эрик. «Наносистемы: молекулярное оборудование, производство и вычисления», 1992.

Представляет физические принципы молекулярной техники, с анализом основного набора устройств.

Губерман, Б. А. «Экология вычислений», 1988.

Этот сборник включает три статьи Миллера и Дрекслера, в которых представлен рыночный подход к организации крупномасштабных вычислений.

Маскилл, Говард. «Физическая основа органической химии», 1985.

Это необычный, полезный учебник, описывающий химию

молекул на основе углерода с точки зрения физической химии.

Ригби, Морис и др. «Силы между молекулами», 1986.

Хороший обзор темы.

Наконец, для тех, кто возражает против попытки объяснить нанотехнологии публике на этом раннем этапе, см. книгу «Как суеверия победили и наука проиграла» Джон К. Бернхэм, 1987.

В нейм описывается, как ученые отказались от своей ответственности в этой области, и к чему это привело.

Для студентов

Смотрите раздел «Нетехническое дальнейшее чтение» и особенно публикации Института Форсайта. Основные достижения в области наукоемких наук часто публикуются в журналах «Наука и природа», которые следует читать каждую неделю.

Глоссарий

Некоторые термины, используемые при обсуждении нанотехнологий и других ожидаемых технологий.

Автоматизированное проектирование — инженерное проектирование, выполняемое компьютерной системой, генерирование подробных проектов из широких спецификаций практически без помощи человека.

Автоматизированное производство — производство на основе нанотехнологий требует небольшого человеческого труда.

Ассемблер — универсальное устройство для молекулярного производства, способное направлять химические реакции путем позиционирования молекул.

Атом — наименьшая единица химического элемента, около трети нанометра в диаметре. Атомы составляют молекулы и твердые объекты.

Атомно-силовой микроскоп (АСМ) — инструмент, способный отображать поверхности с молекулярной точностью путем механического зондирования их контуров. Вид проксимального зонда.

Бактерии — одноклеточные микроорганизмы, около одного микрометра (одна тысяча нанометров) в поперечнике.

Белковый дизайн, белковая инженерия — проектирование и конструирование новых белков; технология для нанотехнологий.

Вирус — паразит (состоящий в основном из генетического материала), который проникает в клетки и захватывает их молекулярные механизмы, чтобы копировать себя.

Герметичная сборочная лаборатория — универсальная сборочная система в контейнере, позволяющая обмениваться с окружающей средой только энергией и информацией.

Дизассемблер — инструмент, способный разбирать структуры по несколько атомов одновременно, записывая структурную информацию на каждом этапе.

ДНК — молекула, кодирующая генетическую информацию, найденную в ядре клетки.

Клетка: небольшая структурная единица, окруженная мембраной, составляющая живые существа.

Клеточная фармакология — доставка лекарств медицинскими наномашинами в точные места тела.

Клеточная хирургия — модификация клеточных структур с

использованием медицинских наномашин.

Массовая технология — технология, в которой атомы и молекулярные вещества обрабатываются в массе, а не по отдельности.

Проксимальные зонды — семейство устройств, способных к точному позиционному контролю и зондированию, включая сканирующие туннельные и атомно-силовые микроскопы; технология для нанотехнологий.

Репликатор — система, способная создавать свои копии, когда она обеспечена сырьем и энергией.

Рибосома — естественная молекулярная машина, которая производит белки в соответствии с инструкциями, полученными из генов клетки.

Система виртуальной реальности — Комбинация компьютерных и интерфейсных устройств (защитные очки, перчатки и т. Д.), Которые создают у пользователя иллюзию нахождения в трехмерном мире компьютерных объектов.

Сканирующий туннельный микроскоп (STM) — прибор, способный отображать проводящие поверхности с атомной точностью; был использован для закрепления молекул на поверхности.

Сценарий Star Trek — кто-то создает потенциально опасные самовоспроизводящиеся устройства, которые катастрофически распространяются.

Умные материалы и изделия (здесь) — материалы и изделия способны относительно сложного поведения из-за включения нанокомпьютеров и наномашин. Также используется для продуктов, имеющих некоторую способность реагировать на окружающую среду.

Благодарности

Многие профессора и студенты в MIT и Стэнфордском университете помогли усовершенствовать технические идеи, лежащие в основе этой книги. Мы также благодарим технических сотрудников лабораторий США, Японии и Швейцарии за критику этих концепций.

Несколько друзей прочитали ранние наброски и внесли предложения по улучшению доступности книги:

Джеймс С. Беннетт, Линда Бойд, Стюарт Бранд, Хайди Кристенсен, Аллан Дрекслер, Хелен Брун, Роджер Дункан, Стэн и Киёми Хатчингс, Пегги Джексон, Джеки Кубал, Ральф Меркл, Расс Миллс, Дженис Морнингстар, Эд Нихаус, Гарольд и Джой Пергамит, Эмми Петерсон, Гордон Петерсон, Норма Петерсон, Дейв Росс, Хайди Уилок Росс, Трейси Шмидт, Сью Шумейкер, Кэрол Шоу, Лейф Смит и Марк Стиглер.

Барри Сильверстайну выражаю особую благодарность за поддержку во время написания этой книги.

Спасибо также нашему транскрипционисту Шери Фьермедал, художнику Полине Фунг, агенту Джону Брокману и редактору Дугу Стампфу.

Перевод Владимира Моисеева

notes

Примечания

1

См. «Нанотехнологии в производстве», Джон Уокер.

2

15 ангстремов = 1,5 нанометра.

3

См. «Нанотехнологии в производстве», Джон Уокер.

4

Текущий адрес и телефон: 7895 E. Acoma Dr., ул. 110, Скоттсдейл, AZ 85260; 1-800-367-2228.